

ŽELEZARSKI ZBORNIK

VSEBINA	Stran
Bratina Janez — Železarna Ravne ELEKTRIČNA OBLOČNA PEČ DANES	29
Koroušič Blaženko — Metalurški inštitut Ljubljana, J. Triplajt, J. Arh — Železarna Jesenice SODOBNA TEHNOLOGIJA IZDELAVE DINAMO JE- KEL PO DUPLEKS POSTOPKU EOP + V (0) D	43
Ule Boris — Metalurški inštitut Ljubljana, J. Vojvodič-Gvardjančič, Š. Stroj- nik — Inštitut za metalne konstrukcije, Ljubljana O MANJ ZNANIH ASPEKTIH NATEZNEGA PREIZ- KUSA	51
Tehnične novice Arh Joža — Železarna Jesenice ZAKAJ PONOVOČNE PEČI V JEKLARNAH	59

LETO 22 ŠT. 2 — 1988

ŽEZB BQ 22 (2) 29—64 (1988)

ŽELEZARSKI ZBORNIK

Izdajajo skupno Železarne Jesenice, Ravne, Štore in Metalurški inštitut Ljubljana

UREDNIŠTVO

Glavni in odgovorni urednik: J. Arh

Uredniški odbor: A. Kveder, J. Rodič, A. Paulin, F. Grešovnik, F. Mlakar, K. Kuzman, J. Jamar

Tehnični urednik: J. Jamar

Lektor: R. Razinger

Prevodi: A. Paulin, N. Smajić (angleški jezik), J. Arh (nemški jezik), P. Berger (ruski jezik)

NASLOV UREDNIŠTVA: Železarski zbornik, SŽ-Železarna Jesenice, 64270 Jesenice, Jugoslavija

TISK: TK Gorenjski tisk, Kranj

IZDAJATELJSKI SVET:

prof. dr. M. Gabrovšek (predsednik), Železarna Jesenice
dr. B. Brudar, Iskra, Kranj

prof. dr. V. Čižman, Univerza v Ljubljani

prof. dr. D. Drobňjak, Univerza v Beogradu

prof. dr. B. Koroušič, Metalurški inštitut Ljubljana

prof. dr. L. Kosec, Univerza v Ljubljani

prof. dr. J. Krajcar, Metalurški inštitut Sisak

prof. dr. A. Križman, Univerza v Mariboru

dr. K. Kuzman, Univerza v Ljubljani

dr. A. Kveder, Metalurški inštitut v Ljubljani

prof. dr. A. Paulin, Univerza v Ljubljani

prof. dr. Z. Pašalić, Železarna Zenica

prof. dr. C. Pelhan, Univerza v Ljubljani

prof. dr. V. Prosenc, Univerza v Ljubljani

prof. dr. B. Sicherl, Univerza v Ljubljani

dr. N. Smajić, Metalurški inštitut v Ljubljani

prof. dr. J. Sušnik, Zdravstveni dom Ravne

dr. L. Vehovar, Metalurški inštitut Ljubljana

prof. dr. F. Vodopivec, Metalurški inštitut Ljubljana

Published jointly by the Jesenice, Ravne and Štore Steelworks, and The Institute of Metallurgy Ljubljana

EDITORIAL STAFF

Editor: J. Arh

Associate Editors: A. Kveder, J. Rodič, A. Paulin, F. Grešovnik, F. Mlakar, K. Kuzman, J. Jamar

Production editor: J. Jamar

Lector: R. Razinger

Translations: A. Paulin, N. Smajić (English), J. Arh (German), P. Berger (Russian)

EDITORIAL ADDRESS: Železarski zbornik, SŽ-Železarna Jesenice, 64270 Jesenice, Jugoslavija

PRINT: TK Gorenjski tisk, Kranj

EDITORIAL ADVISORY BOARD:

prof. dr. M. Gabrovšek (Chairman), Iron and Steel Works, Jesenice

Dr. B. Brudar, Iskra, Kranj

Prof. Dr. V. Čižman, University of Ljubljana

Prof. Dr. D. Drobňjak, University of Belgrade

Prof. Dr. B. Koroušič, Institute of Metallurgy, Ljubljana

Prof. Dr. L. Kosec, University of Ljubljana

Prof. Dr. J. Krajcar, Institute of Metallurgy, Sisak

Prof. Dr. A. Križman, University of Maribor

Dr. K. Kuzman, University of Ljubljana

Dr. A. Kveder, Institute of Metallurgy, Ljubljana

Prof. Dr. A. Paulin, University of Ljubljana

Prof. Dr. Z. Pašalić, Iron and Steel Works, Zenica

Prof. Dr. C. Pelhan, University of Ljubljana

Prof. Dr. V. Prosenc, University of Ljubljana

Prof. Dr. B. Sicherl, University of Ljubljana

Dr. N. Smajić, Institute of Metallurgy, Ljubljana

Prof. Dr. J. Sušnik, Health Centre, Ravne

Dr. L. Vehovar, Institute of Metallurgy, Ljubljana

Prof. Dr. F. Vodopivec, Institute of Metallurgy, Ljubljana

ŽELEZARSKI ZBORNIK

IZDAJAJO ŽELEZARNE JESENICE, RAVNE, ŠTORE IN METALURŠKI INŠTITUT

LETO 22

LJUBLJANA

JUNIJ 1988

Vsebina	Stran	Inhalt	Seite	Contents	Page	Содержание	Страница
J. Bratina Električna obločna peč danes UDK: 621.365:669.041 ASM/SLA: D5, W18S, A5f	29	J. Bratina Der Lichtbogen-Schmelzofen heute UDK: 621.365:669.041 ASM/SLA: D5, W18S, A5f	29	J. Bratina Electric Arc Furnace Today UDK: 621.365:669.041 ASM/SLA: D5, W18S, A5f	29	J. Bratina Электрическая дуговая печь сегодня. UDK: 621.365:669.041 ASM/SLA: D5, W18S, A5f	29
B. Koroušič, J. Triplat, J. Arh Sodobna tehnologija izdelave dinamo jekel po dupleks postopku EOP + V (0) D UDK: 669.14.018.5 ASM/SLA: ST-f	43	B. Koroušič, J. Triplat, J. Arh Moderne Technologie der Erzeugung von Dynamo Stahl nach dem Duplex Verfahren LBO + V (0) D UDK: 669.14.018.5 ASM/SLA: ST-f	43	B. Koroušič, J. Triplat, J. Arh Modern Technology of Manufacturing Dynamo-sheet Steel by the Duplex EAF + V (0) D. Process UDK: 669.14.018.5 ASM/SLA: ST-f	43	B. Koroušič, J. Triplat, J. Arh Современная технология изготовления динамных сталей Дуплекс-процессом UDK: 669.14.018.5 ASM/SLA: ST-f	43
B. Ule, J. Vojvodič-Gvardjančič, Š. Strojnik, K. Kuzman O novih znanih aspektih nateznega preizkusa UDK: 620.172.087.21 ASM/SLA: Q27a	51	B. Ule, J. Vojvodič-Gvardjančič, Š. Strojnik, K. Kuzman Etwas über die weniger bekannten Aspekte des Zugversuches UDK: 620.172.087.21 ASM/SLA: Q27a	51	B. Ule, J. Vojvodič-Gvardjančič, Š. Strojnik, K. Kuzman On Less Known aspects of Tensile Test UDK: 620.172.087.21 ASM/SLA: Q27a	51	B. Ule, J. Vojvodič-Gvardjančič, Š. Strojnik, K. Kuzman О менее известных аспектов испытания растяжения. UDK: 620.172.087.21 ASM/SLA: Q27a	51
Tehnične novice	59	Technische Nachrichten	59	Technical News	59	Технические новости	59



08202511



Elektroobložna peč danes

J. Bratina*

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

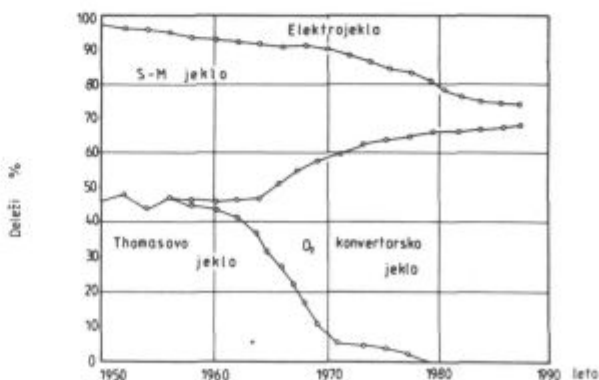
V članku je prikazan zgodovinski razvoj elektroobložne peči za proizvodnjo jekla oziroma njenih tehničnih in tehnoloških faz, ki so omogočile, da je danes delež tako pridobljenega jekla že blizu 25 % svetovne proizvodnje jekla. Podane so njene elektroenergijske karakteristike, vplivi na napajalno omrežje 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 elektroenergetске 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.

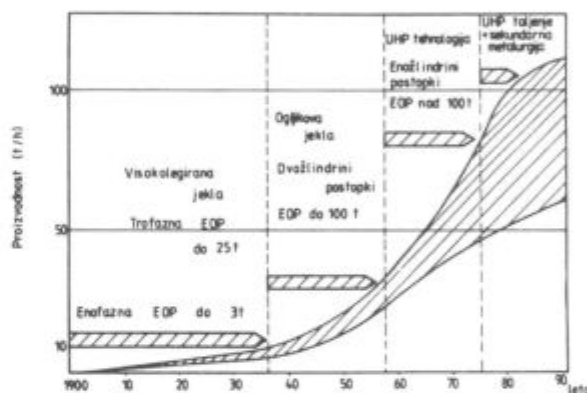
Tabela I: Proizvodnja elektrojekla in deleži v skupni proizvodnji jekla v posameznih državah za leto 1985

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.

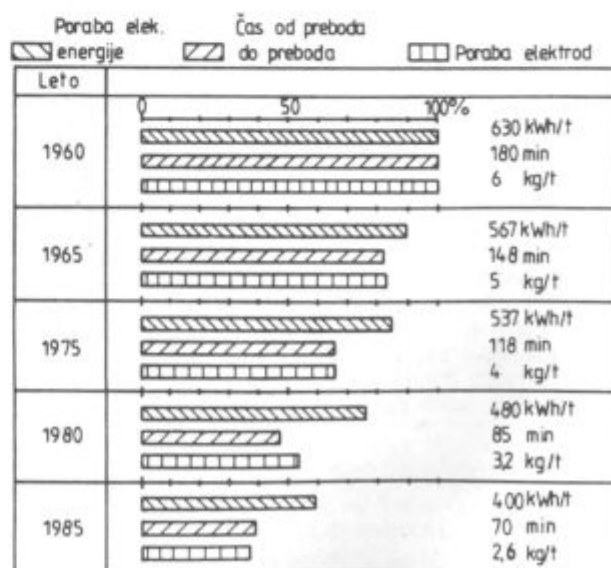
Do takega mesta v količinskem deležu proizvodnje se je elektroobložni peči uspelo prebiti z vrsto tehničnih in tehnoloških inovacij, med katere je v prvi vrsti šteti UHP tehniko. Ob koncu 60-tih let je namreč postalo jasno, da gradnja vedno večjih obložnih peči ne zagotavlja vedno ugodnih proizvodnih 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 specifikke 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 ognjevzdržnega 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 priklon 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 $0,82$.

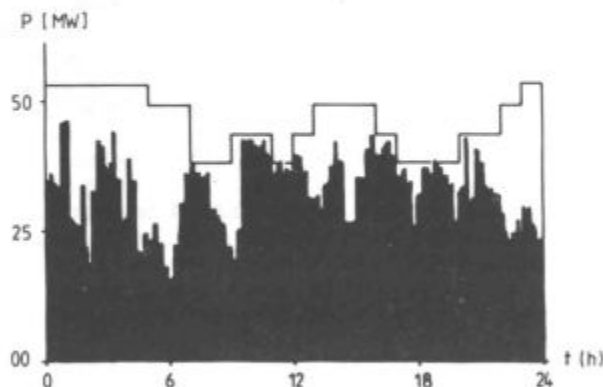
Elektroobločni peči pripadajo torej kompenzacijske naprave jalove moči, ki so v večini primerov kondenzatorske baterije, priključene na velikosti baterije primerne napetosti. Za obvladovanje v omrežju nastopajočih višjeharmonskih komponent se kompenzacijske naprave grade v obliki sesalnih krogov z resonančnimi napravami za 5, 7, 11, 13 komponento, ali pa celo z napravami za dinamično kompenziranje posameznih višjeharmonskih komponent, ki uravnovečujejo 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 dnevnih in mesečnih 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 obločne peči in do popolnih razbremenitev elektroenergetskega omrežja. Nadzorovanje odjema porabnikov električne energije, ki imajo v svoji sestavi poleg osnovne obremenitve tudi elektroobločne 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 obločnih 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 elektroobločne 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 elektroobločnih 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 pričekom 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 obločnih 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 elektroobločne 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
$W_{\check{z}}$ (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;

$R_{\check{z}}$: 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:

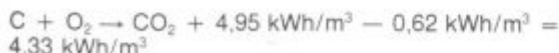
- da se v modernih UHP EOP bistveno povečuje delež rekacijske toplote v entalpiji jekla, kot posledica intenzificirane porabe kisika v peči oziroma uporabe dodatnih energijskih nosilcev;
- da se delež toplotnih izgub z moderno tehnologijo kratkih izdelovalnih časov zmanjšuje kljub uvedbi vodnohlajenih 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:

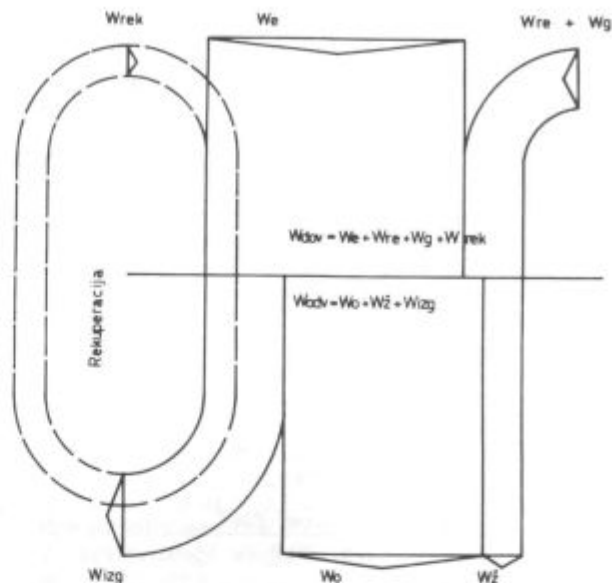
— specifična toplota vložka za segrevanje od 20 ^o C na 1525 ^o C	298 kWh/t
— specifična talilna toplota	56 kWh/t
— specifična toplota taline za segrevanje od 1525 ^o C na 1550 ^o C	6 kWh/t
Skupaj	360 kWh/t

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:

Sankyjev 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:

$$P_{nt} = \frac{1,1 \cdot W_0 \cdot n_0 \cdot T_v}{n_t \cdot n_{el} \cdot \cos \varphi \cdot t \cdot t} \text{ [kVA]},$$

kjer so:

W ₀ (kWh/t)	— specifična energija	W ₀ = 360 kWh/t
n ₀	— delež električne energije	n ₀ = 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 elektroobločnih 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 obločne peči v času taljenja se naslanja na raziskave več kot 100 obločnih peči v Evropi; upošteva zakonitosti geometrijske rasti velikosti elektroobločne 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 elektroobločne 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 (454)	0,763 (472)
90	0,828 (435)	0,798 (451)	0,771 (467)
110	0,830 (434)	0,803 (449)	0,777 (463)

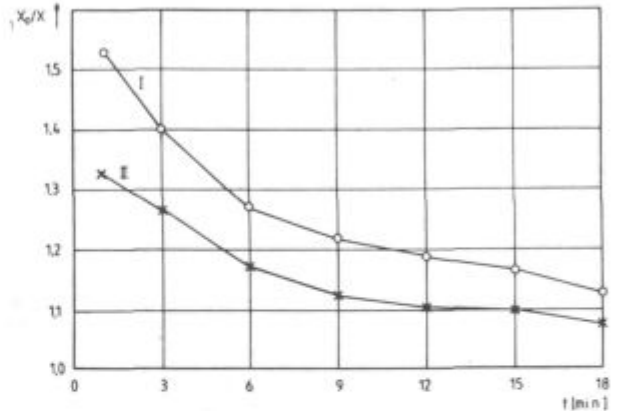
Za določitev elektroenergetskih parametrov pri taljenju so najvažnejše induktivne in ohmske upornosti pečnega tokokroga, ugotovljene z meritvijo kratkega stika peči. Te niso vplivno odvisne od zakonov geometrijske rasti obločne peči; karakteristične vrednosti induktivnih upornosti so:

- pri obločnih pečeh 5 t—10 t $X = 3,5\text{--}5,5$ mohm
- pri obločnih 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:

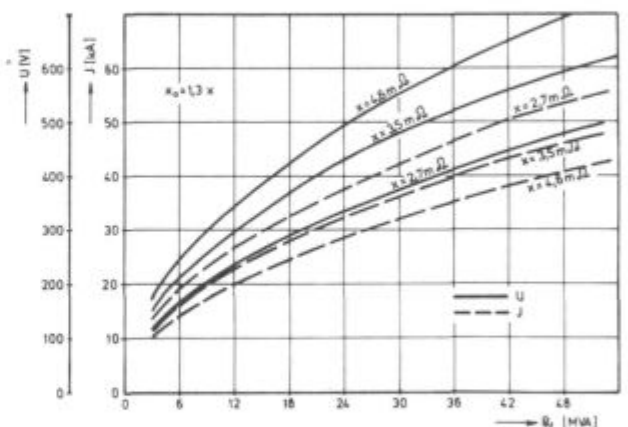
$$U = \sqrt{\frac{P_{nt} \cdot X_0}{\sin \varphi}} \text{ [V]}$$

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.

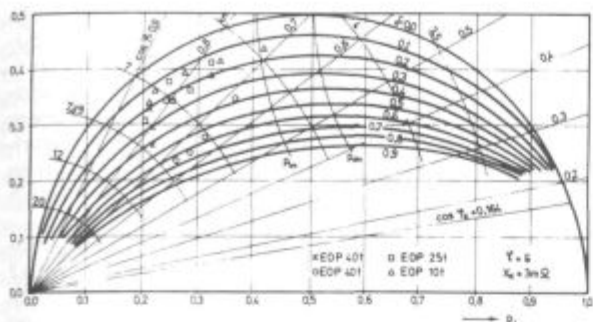


Slika 7:

Maksimalne vrednosti napetosti in tokov taljenja elektroobložne peči

Fig. 7:

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

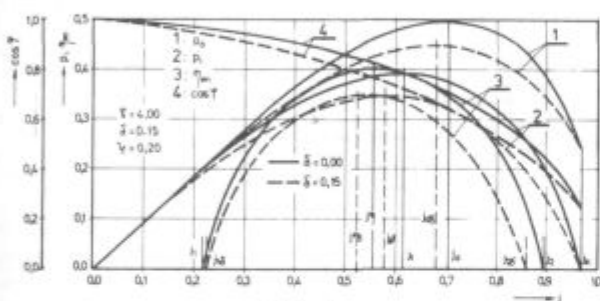


Slika 8:

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 z 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

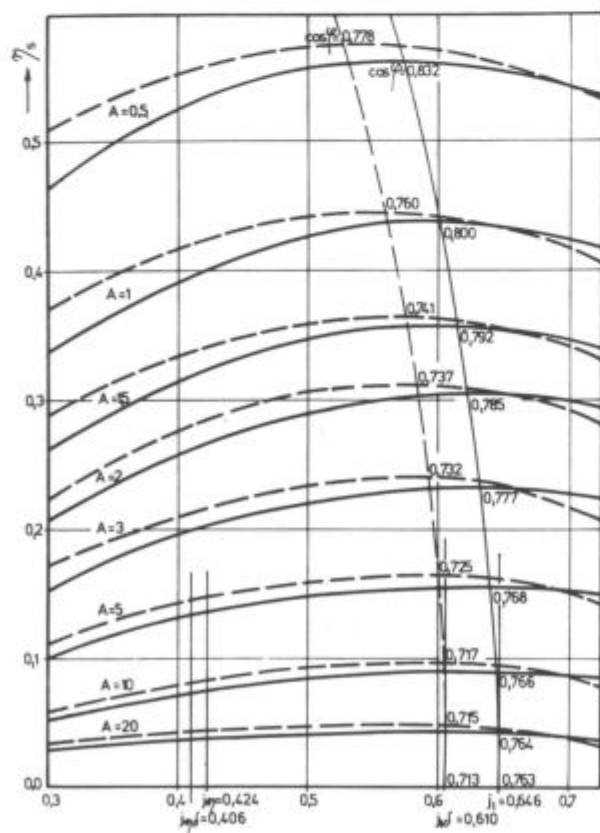
pri največji moči na loku. Pri maksimalni moči na loku $j=0,610$ ($\cos \varphi = 0,713$) pa bo energijski učinek 4,7 % slabši od maksimalnega. Očitno je, da leži optimalno taljenje nekje med obema vrednostma, določa ga najnižja skupna vrednost stroškov za porabljeno energijo in stalnih (kapitalnih)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

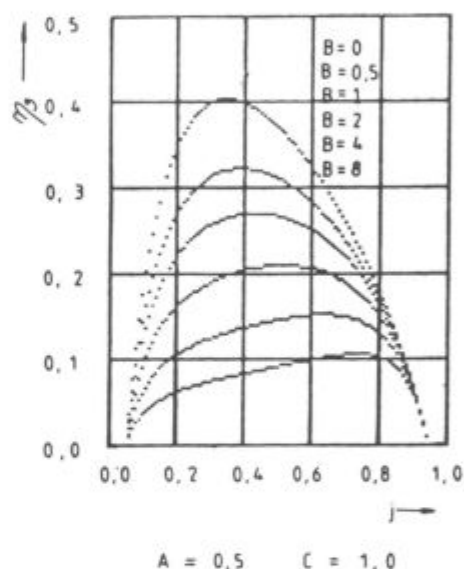
Fig. 10:

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:

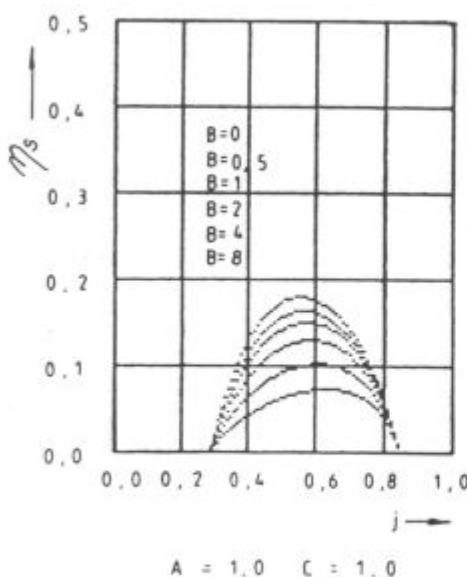
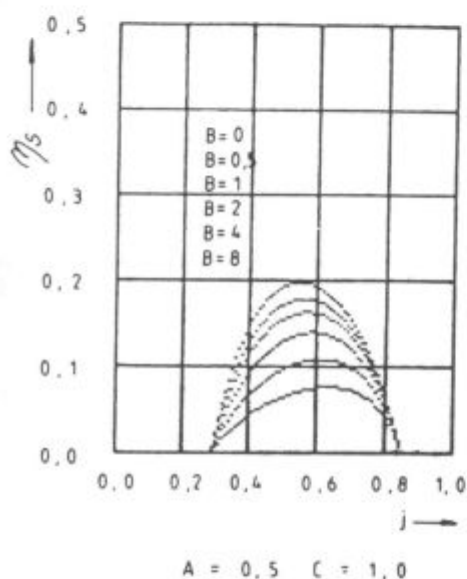
Relativni energijski stroški ob začetku taljenja

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

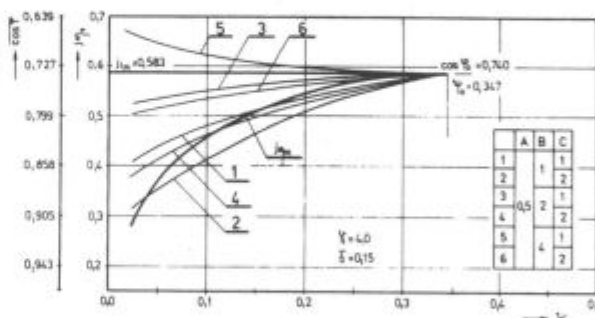
Pri tem pomeni B razmerje stroškov obzidave proti stroškom teoretske porabe električne energije, C pa razmerje stroškov porabe grafitnih elektrod proti stroškom teoretske porabe električne energije.

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)	$\cos \varphi z$	$\cos \varphi k$	tt (h)	$\cos \varphi z$	$\cos \varphi k$	tt (h)	$\cos \varphi z$	$\cos \varphi k$
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:

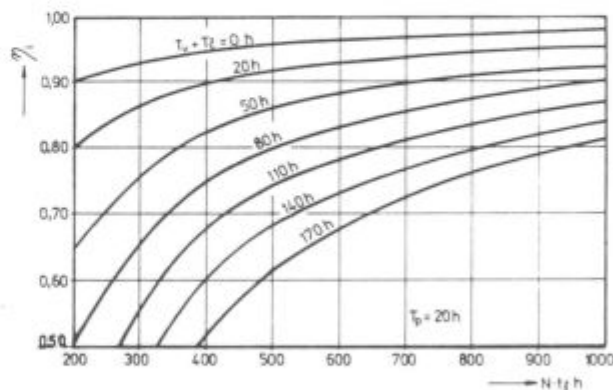
tp (h) — čas za obnovo obzidave

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:

$$Q1 = nli \cdot i \cdot T_v \cdot tl / t_s$$

Z upoštevanjem že izvedenih relacij pa dobimo končno obrazec

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

Pri čemer so:

- nlič — letna izraba časa
- i — izplen
- T_v (t) — teža vložka
- tl (h) — letne obratovalne ure
- t_s (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 $nli = 0,78$ 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 reducirala 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 doziranje 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.

Sodobna tehnologija izdelave dinamo jekel po duplex postopku EOP+V(O)D

B. Koroušič*, J. Triplat**, J. Arh**

UDK: 669.14.018.5
ASM-SLA: ST-1

Z izgradnjo VOD naprave v stari jeklarni železarne Jesenice so se odprle nove možnosti za izboljšanje klasične tehnologije izdelave dinamo jekel, ki je detajlno opisana v naših publikacijah (1, 2, 3, 6).

Nova tehnologija izdelave dinamo jekel v železarni Jesenice sloni na naslednjih delovnih fazah (3, 6):

A) EOP:

- raztalitev vložka v EOP-peči z ekscentričnim prebodom (EBT) z nominalno težo 85 ton in transformatorjem moči 65 MVA,
- oksidacija ogjlika s plinskim kisikom,
- gretje taline,
- prebod.

B) Priprava taline za VOD:

- posnemanje pečne žilindre iz ponovce,
- dodatki za novo žilindro.

C) VOD:

- razogljčenje z lastnim kisikom oziroma delna oksidacija s plinskim kisikom,
- legiranje taline s 75 % FeSi in Al (delno s FeMnA),
- razplinjanje pri nizkem vakuumu.

D) Litje:

- klasično litje v brame (stara jeklarna) in kontilitje v slabe, debeline 160 do 250 in širine 800 do 1600, z vrtljivim stolpom za sekvenčno litje (nova jeklarna).

Železarna Jesenice proizvaja številna kvalitetna jekla, kot so mikrolegirana konstrukcijska jekla, jekla za globoki vlek, jekla za elektro industrijo, nerjavna avstenitna in feritna jekla.

Letna proizvodnja v letu 1984 je znašala 474.709 ton, od tega 65 % po SM-postopku in 35 % po elektro postopku v kombinaciji z VOD in TN-postopkom.

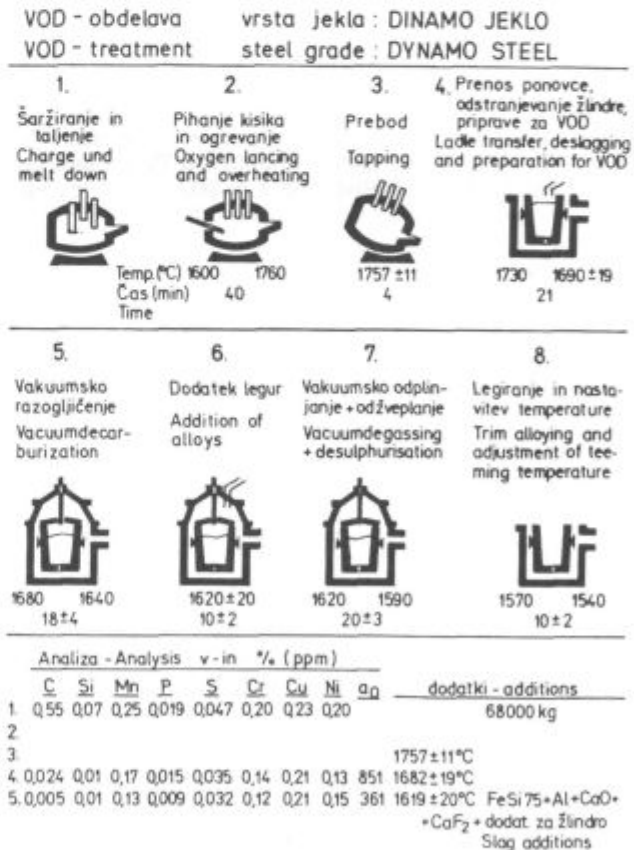
Večji del te proizvodnje je ploščati (70 %) program, ostalo pa žični ter profilni. Največji del omenjene proizvodnje se odlije v klasične brame, medtem ko manjši del, cca 60.000 ton, pokriva konti litje (gredice).

Namen članka je, da predstavi rezultate najnovejših raziskav in razvoj tehnologije izdelave dinamo jekel v Železarni Jesenice.

ANALIZA TEHNOLOGIJE IZDELAVE DINAMO JEKEL PO POSTOPKU EOP + VOD

V stari elektrojeklarni v železarni Jesenice je instalirana VOD-naprava, nominalne kapacitete 65 t, v kateri se od julija 1984 izdelujejo različne vrste dinamo jekel, medtem ko v novi jeklarni od leta 1987 obratuje nova 80-tonska VOD-naprava.

VOD-napravi je priključena tudi naprava za legiranje z 10 silosi. Legiranje je možno pod vakuumom, kakor tudi



Slika 1.

Shematska ponazoritev poteka izdelave šarže kvalitete dinamo jekla v Železarni Jesenice

Fig. 1

Schematic presentation of making melt for dynamo-sheet steel in Jesenice Steelworks

* Blaženko Koroušič, hab. doc. dr. mag. dip. inž. met., — Metalurški inštitut Ljubljana

** J. Triplat, J. Arh — Železarna Jesenice

pri odprti ponvi. Vakuumske črpalke sestojijo iz dveh obročnih vodnih črpalk in štirih parnih ejektorjev.

Na sl. 1 je prikazana shema VOD-naprave v železarni Jesenice.

Tehnologija proizvodnje dinamo jekel po duplex-postopku EOP+V(O)D tudi v svetu ni tako razširjena in je zato v strokovni literaturi za to temo zelo malo uporabnih podatkov.

Priprava taline za VOD-napravo

- taljenje vložka;
- oksidacija ogljika in odprava fosforja;
- ogrevanje taline.

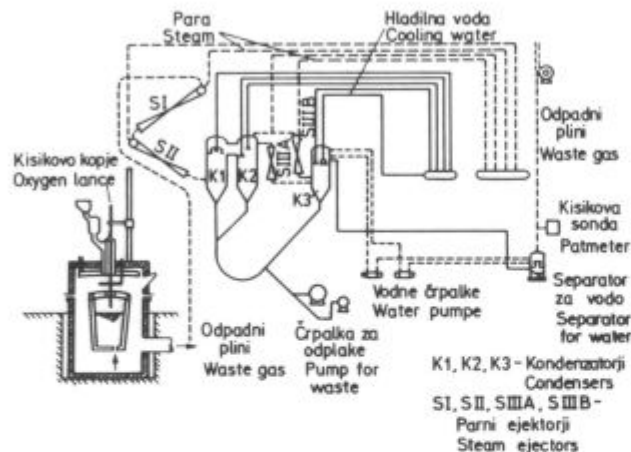
Vložek je sestavljen iz lastnega odpadka ter starega železa, in sicer tako, da je zagotovljena vsebnost ogljika v prvem preizkušancu med 0,30 in 0,50 %. Dosedanje izkušnje so pokazale, da je pri teh količinah ogljika možno v fazi oksidacije brez večjih problemov doseči potrebne visoke prehodne temperature, ki se gibljejo okrog 1750—1760 °C.

Pri izvajanju faze oksidacije je potrebno zagotoviti takšne pogoje, da imamo po preobodu taline in odstranitvi pečne žilindre pred vakuumom 0,04—0,05 % C in določeno vsebnost Mn, ki naj se giblje med 0,10 in 0,20 % Mn.

To tehnološko zahtevo dosežemo s primerno tehnologijo pihanja kisika in dinamiko vodenja izdelave šarže v peči.

Tehnološke faze v VOD-napravi

VOD-naprava v železarni Jesenice, kapacitete 70 ton, ki jo je izdelala firma STANDARD-MESSO, sestoji iz obzidane vakuumske komore, argonskega priključka za VOD-ponovco in vakuumskega sistema. Na plašču pokrova je opazovalna odprtina z loputo in TV-kamero ter cevni nastavek za kisikovo kopje in 500-litrska posoda za legiranje z dvojnimi zvonastimi zaporami, ki omogočata legiranje pod vakuumom (sl. 2).



Slika 2.

Shema 70-tonnske VOD-naprave v stari jeklarni v Železarni Jesenice

Fig. 2

Scheme of 70 ton VOD set-up in the old steel plant in Jesenice

Vakuumska oksidacija

Po preobodu taline v VOD-ponovco izvršimo posnemanje žilindre in postavimo ponovco v vakuumsko komoro.

Praktične izkušnje in analiza rezultatov številnih šarž z matematičnim modelom je pokazala, da v fazi pred vakuumiranjem lahko izvršimo le dve operaciji:

- pri vsebnosti Mn pod 0,10 % korigiramo vsebnost Mn s FeMn affine,
- pri temperaturi taline pod 1650 °C dodamo primerno količino Al za popravek temperature.

Oba parametra, kakor tudi izračun potrebnega pihanja kisika (glede na vsebnost ogljika v talini) in količino dodanega Al, izvedemo na osnovi računalniškega programa.

Po vključitvi vakuumskih črpalk tlak začne hitro padati, istočasno začne talina tudi kuhati, kar pomeni, da se je pričela oksidacija ogljika.

Hitrost razogljčenja je v prvi fazi skoraj linearna in njeno odvisnost za izbrane pogoje definiramo z enačbo:

$$\frac{dC}{dt} = f(C(s) - C(e)) + f(\dot{Q}_{Ar}) + f(a_0(s)) + f(\dot{Q}_{O_2}), \dots (1)$$

kjer pomeni

- C(s); C(e) — startni oziroma ravnotežni ogljik,
- \dot{Q}_{Ar} — intenziteta mešanja taline z Ar (L/min),
- $a_0(s)$ — startna aktivnost kisika,
- \dot{Q}_{O_2} — intenziteta pihanja kisika ($m^3 O_2/h$).

V drugi fazi vakuumske oksidacije hitrost začne pojemati, kar pripisujemo spremembi mehanizma transporta ogljika in taline na fazno reakcijsko površino s plinsko fazo.

Časi vakuumske oksidacije se gibljejo med 10—28 minut, odvisno od startne vsebnosti ogljika, temperature, intenzitete mešanja taline in dr. V celotnem času vakuumske obdelave temperatura enakomerno pada s povprečno hitrostjo okrog 1,5—2,0 °C/min. v odvisnosti od termičnega stanja VOD-ponovce pred preobodom, intenzitete mešanja, količine dodatka apna in dr.

Legiranje jekla in dodatki za žilindro

Pred pričetkom faze razplinjanja izvršimo legiranje taline, ki ima v povprečju pred legiranjem naslednjo povprečno kemično sestavo:

% C	% Si	% Mn	% S	% P
0,006	0,01	0,20	0,0310	0,009

Korekcijo kemične analize izvedemo s pomočjo linearnega programa, ki je del računalniškega programa, pri čemer se upošteva tudi toplotna bilanca taline.

Natančnost legiranje je povsem zadovoljiva zaradi natančnega algoritma za izračun izkoristka elementov, ki sloni na funkcionalni odvisnosti:

$$ETA(X) = F(a_0) + F(DX) + F(Q_m), (2)$$

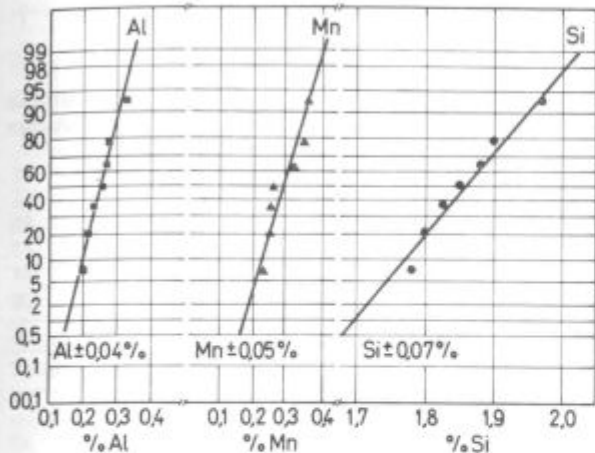
kjer pomeni:

- $F(a_0)$ — funkcionalna odvisnost od aktivnosti kisika pred legiranjem,
- $F(DX)$ — funkcionalna odvisnost od količine dodanega elementa X,
- $F(Q_m)$ — funkcionalna odvisnost od teže šarže.

Standardne vrednosti legiranja Si in Al se gibljejo v mejah:

- Si ± 0,07 %
- Al ± 0,04 %
- Mn ± 0,05 %

Večino odstopanj lahko pripišemo vplivu teže šarže ter nihanjem v kemični sestavi legur (sl. 3).



Slika 3.

Porazdelitev Mn, Si, Al v talinah kvalitete dinamo jekla po legiranju

Fig. 3

Distribution of Mn, Si, Al in the melt for dynamo-sheet steel after alloying

Faza razplinjanja in razžveplanja jekla

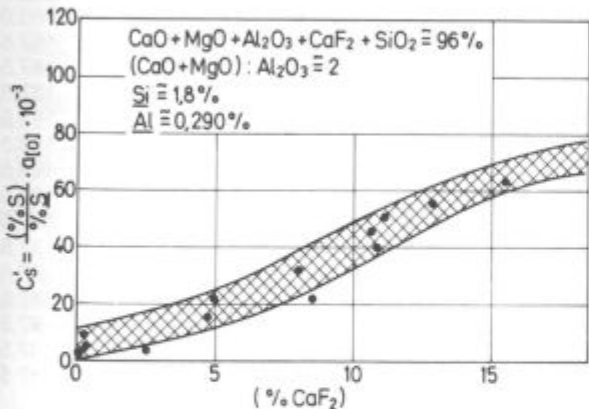
Po končanem dodatku legur v talino dodamo še dodatke za žlindro, in sicer: CaO in CaF₂. Količina dodatkov se izračuna na osnovi matematičnega modela, ki sloni na poznavanju kapacitete žvepla sintetične žlindre tipa:

$$55\% (CaO + MgO) + 30\% Al_2O_3 + 15\% CaF_2$$

in bilance žvepla v jeklu in žlindri pred procesom razplinjanja in razžveplanja in po njem (4, 5).

Na kapaciteto žvepla ima precejšen vpliv vsebnost CaF₂ v žlindri, ker znižuje tališče in s tem direktno vpliva na fluidnost žlindre (sl. 4).

Zaradi intenzivnega mešanja jekla s sintetično žlindro in zelo ugodnih termodinamičnih pogojev (aktivnost kisika znaša okrog 1 ppm) poteka intenzivna izmenjava žvepla med talino in žlindro (sl. 5).

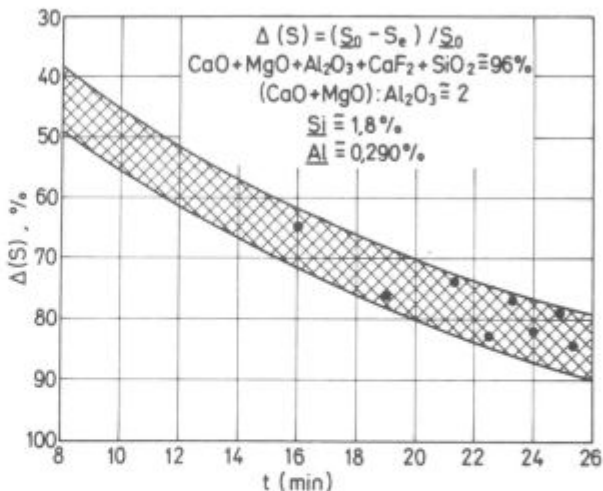


Slika 4.

Vpliv dodatka jedavca na porazdelitev žvepla $\frac{(\% S)}{\% S} \cdot a_{01}$ pri odžveplanju dinamo jekel v VOD-napravi

Fig. 4

Influence of added fluor spar on the distribution of sulphur $\frac{(\% S)}{\% S} \cdot a_{01}$ in desulphurisation of dynamo-sheet steel in the VOD set-up



Slika 5.

Kinetika odprave žvepla med degazacijo v VOD-napravi.

Fig. 5

Kinetics of desulphurisation during degassing in the VOD set-up

Na osnovi poznavanja izhodne in zaželenene ali načrtovane vsebnosti žvepla ter kinetike razžveplanja lahko zelo natančno določimo čas obdelave v vakuumu, ki se giblje med 15 in 30 min.

V tem času poteka tudi odprava vodika in oksidnih vključkov.

Povprečne vsebnosti žvepla v končnih preizkušancih za večje število šarž ležijo med 70 in 90 ppm.

Kemična sestava žlindre po končanem razžveplanju ima tipično sestavo:

$$55,5\% (CaO + MgO); \quad 28,1\% Al_2O_3; \quad 12,6\% CaF_2; \\ 3,6\% SiO_2; \quad 0,50\% (FeO + MnO).$$

Matematični model za VOD-proces

Računalniško podprti program VODES omogoča kompletno vodenje izdelave šarže v VOD-ponovci. Program je sestavljen iz več delov:

- VODES
- informacije o jeklih, legurah, dodatkih
- kontrola procesa oksidacije ogljika v vakuumu
- legiranje in izračun dodatkov za žlindro
- razplinjanje in razžveplanje

Pred pričetkom izdelave šarže operater vnese preko video-terminala naslednje tehnološke parametre:

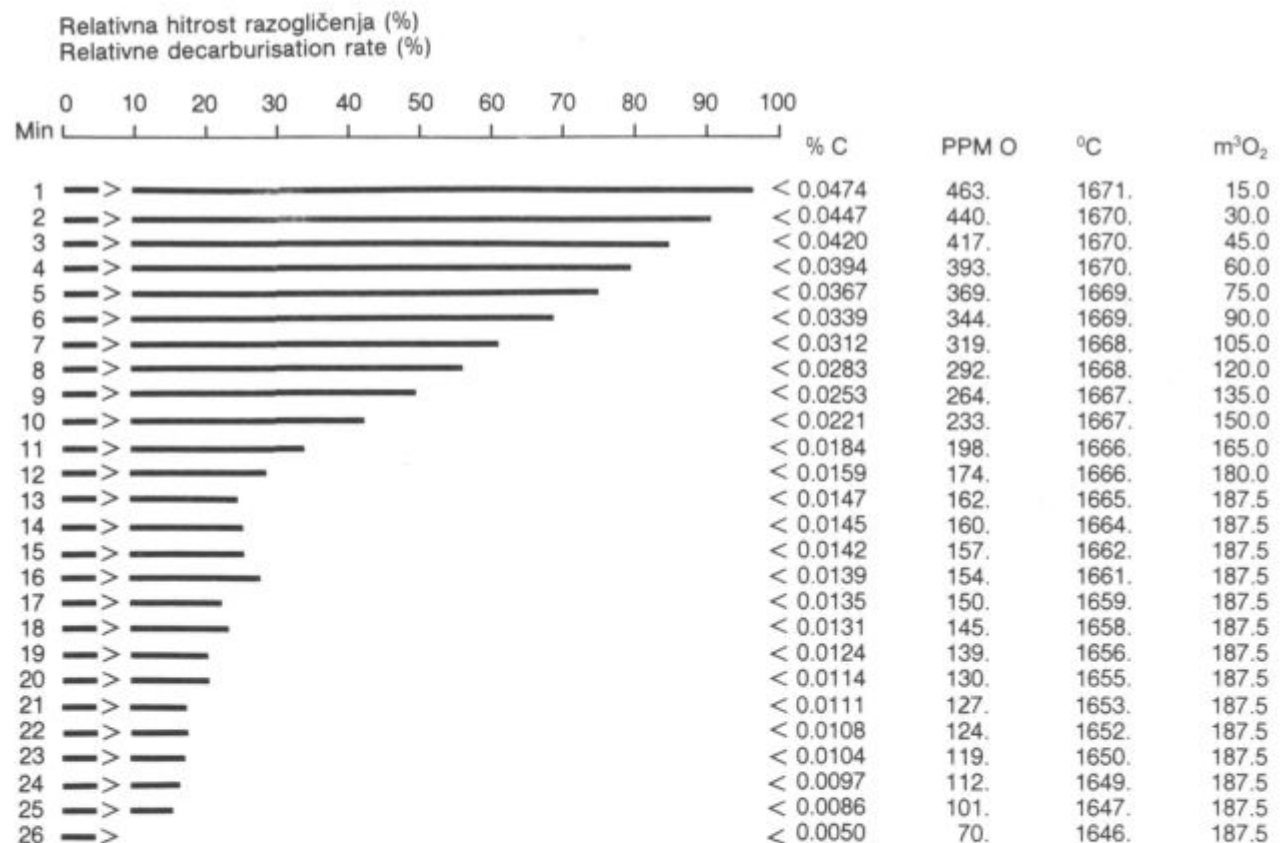
- številko šarže,
- šifro jekla,
- temperaturo taline,
- intenziteto pihanja kisika (m³O₂/h) — v primeru VOD.

V naslednji fazi dobi skozi dialog vse potrebne podatke o potrebni količini kisika za pihanje, količini dodatka FeMn affine ter času trajanja vakuumske oksidacije.

Dinamo jeklo Silicon steel	Program Program	Vodes Vodes			
Datum: Date:	28-avg-86 28-aug-86	Čas: Time:	8.50 8.50	Verzija Version	Vodes Vodes

TEHNOLOŠKI PODATKI:
TECHNOLOGICAL DATA:

Vrsta jekla — Steel grade	= EVC 17
Šifra jekla — Steel code	= 12
Teža taline v VOD-ponovci (kg) — Charge weight in VOD (kg)	= 68000.00
Začetna temp. v VOD-ponovci (°C) — Initial VOD temp. (°C)	= 1643.00
Št. šarže — Heat No.	= 117362.
Poraba kisika — Consumption of oxygen	= 186. m ³ — 186 m ³
Čas pihanja	= 12 min. in 22 sec.
pri pretoku kisika	= 900. m ³ /h
Blowing time	= 12 min. and 22. sec.
by oxygen rate	= 900. m ³ /h
Izračunani dvig temperature po oksidaciji ALUMINIJA	= 28. °C
Computed temperature incrise after ALUMINIUM oxidation	= 28. °C
Izračunana temperatura pred vakuumsko obdelavo	= 1671. °C
Computed melt temperature before vacuum treatment	= 1671. °C



Izračunani padec temperature po dodatku 1000 kg apna in 100 kg CaF₂ = 32° C.
Computed loss of temperature after addition of 1000 kg lime and 100 kg fluorspar = 32° C.

Slika 6.

Protokol o dinamiki vakuumske oksidacije ogljika v 70-tonski
VOD-napravi (računalniški izpis)

Fig. 6

Record of dynamics of vacuum oxidation of carbon in the
70 ton VOD set-up (computer record)

Šifra Code	Legura Alloys	Legiranje			Ponovca v peči		
		Cena Price din	Teža Weight kg	Vrednost Value din	Cel. teža Tot. weight kg	Cena legiranja Price of alloy din/kg	
10	FeSi 75	253.56	1513.	383598.31			
28	FeMn	328.05	85.	27941.29			
26	Al	613.49	346.	212494.81			
11	FeMnHC	58.39	0.	0.00			
12	SiMn	157.72	0.	0.00			
90	Karburit	83.82	0.	0.00			
Skupaj: Total:			1944.	624034.44	69944.40	320.94	
			1944.	624034.44	69944.40	320.94	

El	Pred legiranjem Before alloying (%)	S. meja L. limit	Z. meja H. limit	Cilj Aim	KG. EL KG-EL	Izkor. Yield	Doseženo Achieved (%)
C	0.00	0.010	0.020	0.018	3.53	0.93	0.010
Si	0.02	1.400	1.990	1.600	1150.38	0.96	1.599
Mn	0.16	0.200	0.300	0.250	75.68	0.85	0.253
Al	0.00	0.250	0.350	0.300	370.14	0.56	0.296

Temp. pred legiranjem Temp. before alloy (°C)	Temp. po legiranju Temp. after alloy (°C)	Sprem. temp. Temp. change (°C)
1613.	1621.	8.0

Slika 7.

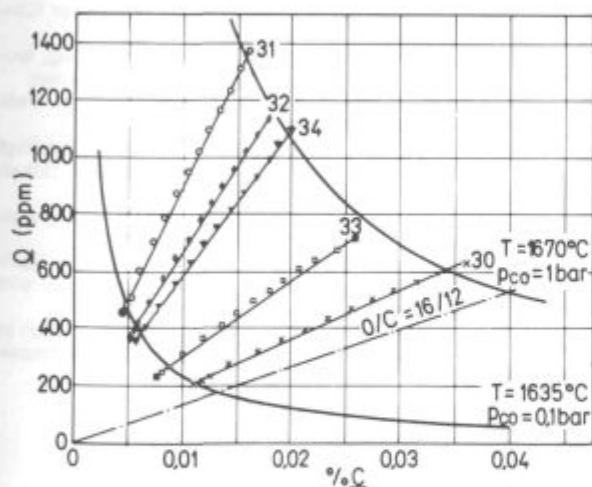
Protokol o legiranju dinamo jekel (računalniški izpis)

Fig. 7

Record on alloying dynamo-sheet steel (computer record)

Odločitev o pihanju kisika prinaša računalnik na osnovi znane vsebnosti ogljika v talini pred vakuumom ter podatka o dodatku Al za ogrevanje taline.

V naslednji fazi avtomatično izračuna naslednje podatke:



Slika 8.

Vpliv izhodnega ogljika pred vakuumsko oksidacijo v VOD-napravi na kinetiko razogljčenja in vsebnost aktivnega kisika

Fig. 8

Influence of initial carbon content before the vacuum oxidation in the VOD set-up on the decarburisation kinetics and the content of active oxygen

- količino dodatka FeSi 75, Al, FeMnA,
- količino dodatkov v žindro (CaO, CaF₂),
- temperaturo taline pred fazo razžveplanja,
- čas trajanja faze razžveplanja,
- končno temperaturo taline po prenosu VOD-ponovce iz vakuumske komore.

Pri izračunavanju dodatka ferrolegur program upošteva dejanske izkoristke elementov Si in Al glede na aktivnost kisika v talini pred dodatkom legur v talino.

Na sl. 6 in 7 je predstavljen tipičen primer protokola računalniškega izračunavanja za fazo oksidacije ogljika in legiranja.

Zaradi analize VOD-procesa z matematičnim modelom poteka celotni proces vakuumske oksidacije ogljika v optimalnih pogojih.

Kot je razvidno s sl. 8, dosežemo najnižje kisike po končani oksidaciji pri najvišji izhodni vsebnosti ogljika. Glede na to ugotovitev smo izvršili korekcijo tehnološkega predpisa v EOP, ki mora zagotoviti izhodno vsebnost ogljika med 0,04 in 0,05 % C.

Ekonomičnost VOD-procesa

Izdelava dinamo jekel po duplex-postopku EOP+V(O)D je ekonomičen postopek, če se zagotovijo optimalni tehnološki pogoji.

Zelo pomemben dejavnik je čas obdelave, s katerim je povezano termično stanje ponovce ter brezhibno mešanje taline z argonom.

Zaradi računalniško vodenega procesa je dana možnost optimalnega izkoriščanja časa, ker trajanje vakuumske obdelave v fazi oksidacije ogljika in razžveplanja

predstavlja okrog 70 % celotnega časa obdelave. S tem znatno vplivamo na porabo ognjevarnega materiala, temperaturne izgube in porabo aluminija za ogrevanje taline.

ZAKLJUČKI

Tehnologija izdelave dinamo jekel po duplex-postopku EOP+V(O)D je tudi v svetu redkost, zato so praktične izkušnje in razvita tehnologija v železarni Jesenice za jeklarje vsekakor zanimive.

Zlasti zanimiva je tehnologija vodenja procesa vakuumske oksidacije ogljika z uporabo računalniško podprtega sistema, ki omogoča operaterju lažje odločitve in prinaša uporabne tehnološke podatke, ki so zanesljivi in dostopni že pred pričetkom procesa.

Osnovne prednosti duplex-postopka EOP+V(O)D pri izdelavi dinamo jekel so:

— Izdelava taline v EOP je krajša in brez posebnih metalurških zahtev. Zahteva se intenzivna oksidacija ogljika, da bi znižali vsebnost dušika do minimalnih vrednosti.

— Oksidacija ogljika v EOP se mora voditi tako, da ima talina pred pričetkom vakuuma v VOD-napravi optimalno vsebnost ogljika (0,04—0,05 % C).

— Vakuumska oksidacija ogljika v vakuumu je hitra in zanesljiva, pri čemer se dosežejo vrednosti ogljika tudi do 50 ppm.

— Legiranje Si se izvede s cenejšimi legurami, kar predstavlja občuten prihranek v strukturi stroškov (zamenjava čistega Si s 75 % FeSi).

— Visok izkoristek legiranja s Si (ca. 96 %) zaradi nizke aktivnosti kisika (vsebnost Al leži med 0,25—0,35 %).

— Odlična in zanesljiva faza razžveplanja in doseganje nizkih vsebnosti žvepla (70—90 ppm).

— Visoka livnost jekla in zadovoljiva čistoča jekla, kar je posebej pomembno za kontinuirano litje dinamo jekel v slabe.

— Računalniško vodenje ključnih tehnoloških faz v VOD-napravi, kar ima številne prednosti v primerjavi s klasičnim vodenjem šarže.

LITERATURA

1. Koroušič, B., O. Kürner, J. Arh.: Prispevek k optimizaciji proizvodnje dinamo jekel, Železarski zbornik 17 (1983), 1, 9—14.
2. Koroušič, B., J. Triplat: Analiza vzrokov za visoko vsebnost celokupnega kisika pri izdelavi dinamo jekel, Poročila Metalurškega inštituta v Ljubljani, MI 85-008 (1985)
3. Arh, J., B. Koroušič, J. Triplat: Production of Silicon Steels by the VOD Process in Iron and Steel Works Jesenice, European Electric Steel Congress, Florence Italy, 29th September — 1st October 1986
4. Fruehan, R. J.: Desulfurisation of Liquid Steel Containing Aluminium or Silicon with Lime, Metall. Tran. B, Vol. 9 B, (1978), June, 287—292
5. Schürmann, E., R. Bruder, K. Nürnberg, H. Richter: Beitrag zur Schwefellöslichkeit in CaO-Al₂O₃-Schlacken, Arch. Eisenhüttenwes., 50 (1979), 4, 139—143
6. Koroušič, B., J. Triplat, J. Arh, V. Prešern: Recent Development of the VOD proces for Manufacturing High-Quality Dynamo Steel, VAD/VOD '86, 3rd. International Conference, Aachen, October 14.—17. 1986

ZUSAMMENFASSUNG

Technologie der Erzeugung von Dynamo Stahl nach dem Duplex Verfahren LBO-V(O)D ist auch in der Welt eine Seltenheit, deswegen sind die praktischen Erfahrungen und die Entwickelte Technologie im Hüttenwerk Jesenice für die Stahlwerke um so mehr interessanter. Besonders interessant ist die Technologie der Vakuumentkohlung mit der Anwendung eines Rechnerunterstützten Systemes, welches dem Bedienungsmann die Entscheidungen leichter macht, durch die zuverlässigen technologischen Daten, die schon vor dem Prozessanfang zur Verfügung sind.

Die Vorteile des Duplex Verfahrens EOP+V(O)D bei der Erzeugung von Dynamo Stahl sind:

— Die Erzeugung der Schmelze im LBO ist kürzer und ohne besonderer metallurgischer Ansprüche. Eine intensive Kohlenstoffoxydation zur Reduzierung des Stickstoffgehaltes ist erforderlich.

— Die Frischperiode im LBO soll so geführt werden, dass vor der Vakuumentkohlung in der Schmelze ein optimaler Kohlenstoffgehalt von 0,04 bis 0,05 % vorliegt.

— Die Vakuumentkohlung ist schnell und zuverlässig, wobei Kohlenstoffgehalte auch bis zu 50 ppm erreicht werden.

— Das Legieren von Si wird mit relativ billigem FeSi 75 durchgeführt (früher Si Metall).

— Ein hohes Ausbringen von Si (ca. 96 %) ist bedingt durch die niedrige Sauerstoffaktivität der Schmelze (Al Gehalt ist zwischen 0,25 und 0,35 %).

— Erreicht wird ein tiefer und zuverlässiger Endschwefelgehalt (20 bis 90 ppm)

— Gute Vergießbarkeit und ein zufriedenstellender Reinheitsgrad sind besonders wichtig für das Stranggießen von Dynamostahl.

— Führung der entscheidenden technologischen Phasen in der VOD Anlage durch Rechner, was im Vergleich zur klassischen Führung unzählige Vorteile hat.

SUMMARY

Manufacturing dynamo-sheet steel by the duplex EAF+V(O)D process is not a common practice even in the world. Thus the practical experiences and developed technology in the Jesenice Steelworks are in any case interesting for steel-makers.

Especially interesting is the process control of vacuum oxidation of carbon by a computer aided system which facilitates the decision of the operator and gives useful technological data which are reliable and accessible before the beginning of the process.

Basic advantages of the EAF+V(O)D duplex process in manufacturing dynamo-sheet steel are:

— Melt making in EAF is shorter and without special metallurgical demands. Intensive oxidation of carbon is desired in order to reduce nitrogen content to minimum.

— Oxidation of carbon in the EAF must be controlled in such a way that the melt has the optimal carbon content (0.04 to 0.05 %) before the beginning of vacuum treatment in the VOD set-up.

— Vacuum oxidation of carbon is fast and reliable and it enables to reduce carbon content even to 50 ppm.

— Alloying of silicon can be made with cheaper alloys which means perceptible cost savings (using FeSi 75 instead of pure silicon).

— High alloying yield of Si (about 96 %) is achieved due to low oxygen activity (Al content is 0.25 to 0.35 %).

— Excellent and reliable desulphurisation enables sulphur contents as low as 70 to 90 ppm.

— High castability of steel and satisfactory purity is essential for continuous casting into slabs.

— Computer control of basic operational steps in the VOD set-up has numerous advantages compared to the standard control of the process.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология изготовления динамных сталей дуплекс способом EOP + V(O)D применяется в мире пока ещё довольно редко и, поэтому, практические опыты и развитие технологии в металлургическом заводе Железарна Есенице представляют собой для сталеваров значительный интерес.

В особенности интересна технология выполнения процесса окисления углерода в вакууме с применением содействия расчётной системы, которая дает возможность диспетчеру легче принять решение, так как доставляет весьма существенные технологические данные, которые не только надёжны, а также уже доступны до самого начала процесса.

Основные преимущества дуплекс-процесса EOP + V(O)D при изготовлении динамных сталей следующие:

— изготовление расплава в дуговой печи короче без особых металлургических требований. Требуется только интенсивное окисление углерода с целью снижения содержания азота на минимальное значение.

— окисление углерода в дуговой печи надо выполнять таким образом, чтобы расплав до начала действия вакуума в

устройстве имел оптимальное содержание углерода (0,04—0,05 % C).

— вакуумное окисление углерода в вакуумном устройстве осуществляется быстро и надёжно при чём получаются значения на углерод от 0,03 до 0,05 %.

— легирование с кремнием выполняется с более дешёвыми сплавами, что представляет заметное сбережение в структуре расходов место чистого кремния.

— высокий выход легирования кремния составляет прилб. 96 % приписывается низкой активности кислорода (содержание алюминия составляет между 0,25—0,35 %).

— превосходная и надёжная фаза удаления серы с его очень низким содержанием 70—90 ppm.

— высокая текучесть стали а также е удовлетворяющей чистота представляет собой решающее значение для непрерывного литья динамных сталей в слэбы.

— расчётноуправление ключевых технологических фаз в устройстве для раскисления в вакууме имеет многочисленные преимущества в сравнении с классическим изготовлением плавки.

O manj znanih aspektih nateznega preizkusa

B. Ule*, J. Vojvodič-Gvardjančič**, Š. Strojnik**, K. Kuzman***

UDK: 620172.087.21
ASM-SLA: Q27a

Konvencionalne mehanske lastnosti jekel določamo največkrat z nateznim preizkusom. Ako pri tovrstnem preizkušanju izmerimo še maksimalni enakomerni raztezek nateznega preizkušanca, lahko določimo tudi krivulje tečenja jekel, pri visokotrdnih jeklih pa celo lomno žilavost K_{IC} .

1. UVOD

Pri običajnem nateznem preizkusu kovin in zlitin danes še vedno merimo skoraj izključno le mejo plastičnosti, natezno trdnost, kontrakcijo ter povprečni lomni raztezek, ki se nanaša na neko referenčno dolžino nateznega preizkušanca. Vendar pa tako natezna trdnost kot tudi povprečni lomni raztezek nista dejanski lastnosti duktilne kovine. Natezna trdnost namreč ne predstavlja stvarne napetosti v nateznem preizkušancu v trenutku loma, pač pa le neko fiktivno napetost, računano na začetni presek preizkušanca. Za inženirsko prakso pa je tudi tako definirana natezna trdnost nedvomno koristna, saj omogoča dimenzioniranje strojnih delov, tj. izračunavanje dopustnih napetosti, pri katerih praviloma še ne pride do znatne spremembe nosilnega preseka. Ker tudi povprečni lomni raztezek — za razliko od kontrakcije — ne popisuje zadovoljivo lomnega obnašanja duktilnih kovin, je M. Marinček¹⁻³ že večkrat predlagal, da bi ga sploh opustili in raje merili največji enakomerni raztezek e_1 ter dejanski lomni raztezek e_2 , ki ga definiramo kot:

$$e_1 = \frac{A_0}{A_1} - 1, \quad (1)$$

pri čemer je A_0 začetni presek nateznega preizkušanca, A_1 pa lomni presek tega preizkušanca.

V pričujočem zapisu bomo pomen obeh raztezkov teoretično obdelali ter njih utemeljeno rabo eksperimentalno potrdili.

2. TEORETIČNI DEL

Odvisnost med nominalno napetostjo σ^* ter povprečnim raztezkom $\Delta l/l_0$ je običajno prikazana v obliki inženirskega diagrama napetost-deformacija kot nepo-

sreden rezultat nateznega preizkusa. Poleg tovrstnih diagramov pa so pogosto v rabi tudi diagramsko prikazane odvisnosti med tako imenovano pravo napetostjo ter pravo deformacijo. Prava napetost, označili jo bomo s σ , je definirana kot kvocient med natezno silo P ter dejanskim (ne začetnim) presekom A obremenjenega nateznega preizkušanca, medtem ko je prava deformacija ϵ definirana prirastkovno kot:

$$d\epsilon = dl/l = -dA/A \quad (2)$$

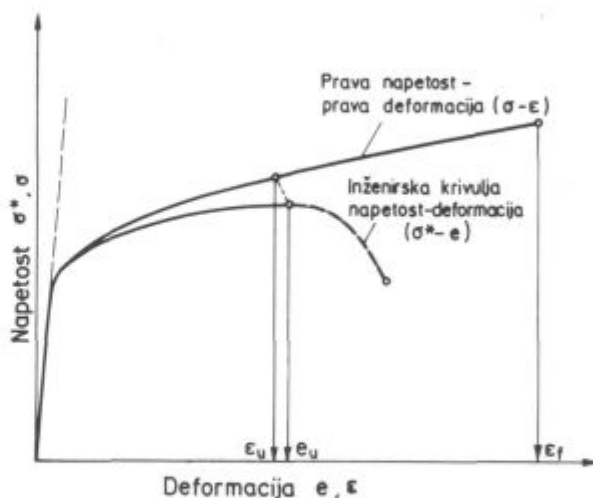
Identiteta (2) sledi iz ugotovitve, da je plastična deformacija strižni proces, ki ne vključuje spremembe volumna. Za ϵ dobimo:

$$\epsilon = \int_{A_0}^A -\frac{dA}{A} = -\ln \frac{A}{A_0} = \ln \frac{A_0}{A} \quad (3)$$

Tako definirano pravo deformacijo pa imenujemo tudi logaritemska deformacija.

V diagramu na sl. 1 je prikazana odvisnost prava napetost—prava deformacija, kot sledi iz inženirske krivulje napetost—deformacija. Dejansko ta odvisnost odsluškava utrjevanje polikristalne kovine, ki ga po Ludwik-Holomonu^{4,5} lahko zapišemo s potenčno funkcijo oblike:

$$\sigma = C\epsilon^n, \quad (4)$$



Slika 1.

Diagram prava napetost—prava deformacija, kot sledi iz inženirske krivulje napetost—deformacija nateznega preizkusa

Fig. 1

Plot of true stress vs. true strain as obtained from the engineering stress—elongation curve of the tensile test

* Boris Ule, dipl. inž. met. — Metalurški inštitut Ljubljana
Stanovanje: Pijava gorica 52, 61291 Škofljica
Rokopis prejet: 10. 2. 1988
Originalno objavljeno: ŽZB 22/1988/2

** J. Vojvodič-Gvardjančič, Š. Strojnik — Inštitut za metalne konstrukcije, Ljubljana

*** K. Kuzman — Fakulteta za strojništvo, Ljubljana

pri čemer je C konstanta, imenovana trdnostni koeficient, n pa je eksponent deformacijskega utrjevanja kovine.

Pri nateznem preizkusu doseže obremenitev P svojo maksimalno vrednost P_{\max} v trenutku tako imenovane natezne nestabilnosti, ko plastična deformacija postane nehomogena in ko nominalna, tj. inženirska napetost doseže svojo ultimativno vrednost σ_{UTS}^* enako P_{\max}/A_0 . Analitično je ta točka v diagramu prava napetost—prava deformacija definirana s pogojem za stacionarno stanje:

$$\frac{dP}{d\varepsilon} = \theta \text{ in } \sigma \frac{dA}{d\varepsilon} + A \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \theta, \quad (5)$$

saj velja: $P = A\sigma$

Ker je tudi $d\varepsilon = -dA/A$, sledi nadalje:

$$-A\sigma + \frac{A d\sigma}{d\varepsilon} = \theta$$

oziroma:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \quad (6)$$

S substitucijo funkcije (4) v izraz (6) dobimo za maksimalni enakomerni raztezek ε_u vrednost:

$$\varepsilon_u = n, \quad (7)$$

kjer je n že omenjeni eksponent deformacijskega utrjevanja kovine. Ker smo povprečni raztezek e definirali kot:

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{A_0}{A} - 1, \quad (8)$$

dobimo končno za maksimalni pravi enakomerni raztezek izraz:

$$\varepsilon_u = \ln(1 + e_u), \quad (9)$$

pri čemer je e_u maksimalni povprečni enakomerni raztezek, kot ga dobimo iz inženirskega diagrama sila—deformacija nateznega preizkusa.

Določimo sedaj še konstanto C iz potenčne funkcije (4).

Ko natezna sila P in z njo enakomerni raztezek ε dosežeta svoji maksimalni vrednosti P_{\max} oziroma ε_u , dobimo za pravo napetost σ , upoštevaje izraz (4):

$$\sigma = C \varepsilon_u^n \quad (10)$$

Ker je pri tem tudi:

$$\sigma = \sigma_{\text{UTS}}^* (1 + e_u), \quad (11)$$

pri čemer pomeni σ_{UTS}^* nominalno napetost pri P_{\max} , tj. natezno trdnost kovine, kot sledi iz inženirskega diagrama napetost—deformacija, dobimo, upoštevaje enačbe (7), (9), (10) in (11), za konstanto C :

$$C = \sigma_{\text{UTS}}^* \left(\frac{e}{n}\right)^n e = 2,71828 \dots \quad (12)$$

Očitno lahko oba parametra potenčne funkcije (4), namreč konstanto C ter eksponent utrjevanja n določimo kar enostavno iz inženirskega diagrama napetost—deformacija, kot ga dobimo pri nateznem preizkusu. Ta ugotovitev je pomembna na primer za tehnologijo preoblikovanja v hladnem, kjer veljajo krivulje tečenja — tako imenujemo odvisnost med pravo napetostjo ter pravo deformacijo — za temeljne karakteristike materiala.

Krivulje tečenja določamo običajno z diskontinuiranim tlačnim preizkusom valjastih preizkušancev, pri če-

mer z uporabo teflonske folije na kontaktnih površinah zmanjšamo trenje do zelo nizkih vrednosti (računamo s koeficientom trenja 0,024). Na ta način dosežemo skoraj povsem homogeno nakrčevanje preizkušancev. Žal pa tovrstne preizkuse lahko opravimo le v bolj opremljenih laboratorijih, medtem ko običajni natezni preizkus, žice za preoblikovanje v hladnem na primer, lahko izpeljemo v vsaki mehanski preizkuševalnici. Z enačbami (7), (9) in (12) nato določimo eksponent n ter konstanto C , s tem pa je definirana potenčna funkcija (4), namreč krivulja tečenja materiala.

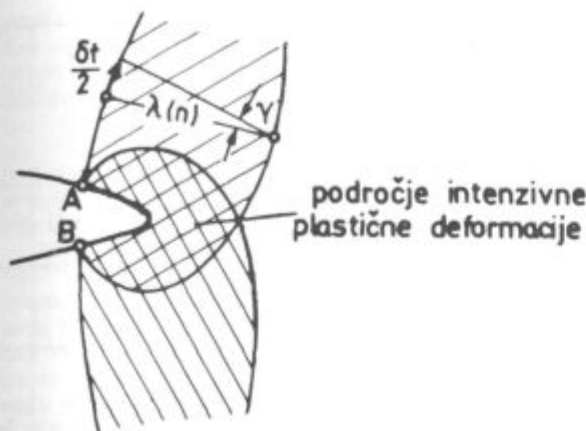
Druga pomembna lastnost materiala, ki jo v nekaterih primerih lahko določimo pri nateznem preizkusu, pa je lomna žilavost K_{IC} . Lomna žilavost oziroma kritični napetostni intenzitetni faktor, kot se tudi imenuje, se v linearni mehaniki loma uporablja kot merilo za odpornost materiala s planarnimi diskontinuitetami proti krhkemu lomu. Težava, na katero včasih naletimo pri merjenju lomne žilavosti, je metodološke narave. Lomna žilavost K_{IC} namreč postane lastnost le materiala (pri znani hitrosti obremenjevanja ter znani temperaturi) šele tedaj, ko so pri merjenju doseženi pogoji ravninskega deformacijskega stanja, tj. ko debelina standardnega CT-preizkušanca za določevanje lomne žilavosti (Compact Tension Specimen) preseže neko minimalno vrednost, določeno z izrazom:

$$B \geq 2,5 (K_{\text{IC}}/\sigma_{\text{ys}})^2, \quad (13)$$

pri čemer je B debelina CT-preizkušanca v mm, σ_{ys} je meja plastičnosti v Nmm^{-2} , K_{IC} pa je, kot rečeno, lomna žilavost v $\text{Nmm}^{-3/2}$. Faktor $(K_{\text{IC}}/\sigma_{\text{ys}})^2$ v izrazu (13) določa velikost plastične cone, razvite ob vrhu utrujenostne razpoke CT-preizkušanca. Ta cone mora biti zadosti majhna v primerjavi z dimenzijami preizkušanca, če naj ostane makroskopsko obnašanje preizkušanca pri obremenjevanju linearno elastično. Ogosto se zgodi, da debeline strojnih delov ali delov konstrukcij bodisi niso zadostne, da bi iz njih izdelali veljavne CT preizkušance bodisi nimamo na voljo ustreznih naprav za merjenje lomne žilavosti bodisi potrebujemo le okvirne vrednosti za K_{IC} za prve, grobe ocene dopustnih velikosti napak na konstrukcijah. V takšnih primerih lahko za določevanje lomne žilavosti uporabimo kar natezni preizkus, saj sta G. T. Hahn ter A. R. Rosenfield⁵ prav na modelu nateznega preizkusa zasnovala svojo polempirično koncepcijo določevanja lomne žilavosti. Upoštevala sta, da so razmere v korenu obodne zareze na cilindričnem nateznem preizkušancu analogne razmeram pri gladkem cilindričnem nateznem preizkušancu z močno zoženim vratom (sl. 2). Ker je duktilna ločitev materiala deformacijsko kontroliran proces, morajo lokalne deformacije v korenu zareze oziroma na mestu zoženja doseči neko kritično vrednost. Odpiranje ustja zareze (razdalja med točkama A in B na sliki 2, označena z δ_1) postane pomembno, kakor hitro ga lahko povežemo z lokalnimi deformacijami v korenu zareze oziroma na mestu zoženja. Širina cone intenzivne plastične deformacije pa ni konstantna, ker je v pogojih ravninskega deformacijskega stanja odvisna od eksponenta deformacijskega utrjevanja n . Gerberich⁷ je opazil, da z naraščanjem eksponenta utrjevanja n narašča tudi λ (n), intenziteta deformacij pa pada, kot je to prikazano na sl. 3. Strižno deformacijo v korenu zareze lahko zapišemo v obliki⁸:

$$\gamma = \frac{\delta_1}{2} / \lambda(n) \quad (14)$$

Jedkanja plastične cone kažejo, da deformacija v tej coni ni enakomerna, zato lahko predpostavimo linearno porazdelitev deformacije, nadalje pa predpostavimo tudi,

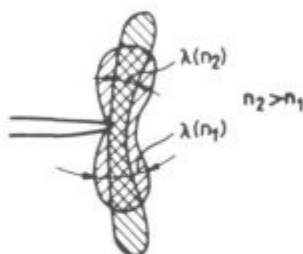


Slika 2.

Model ravninske deformacijske plastične cone v korenu zarez obremenjenega preizkušanca

Fig. 2

Model of plane deformation plasticity zone in the notch root of loaded test piece



Slika 3.

Vpliv eksponenta deformacijskega utrjevanja na obliko plastične cone

Fig. 3

Influence of the strain-hardening exponent on the shape of plasticity zone

da je povprečna deformacija $\bar{\epsilon}$ v področju intenzivne plastične deformacije enaka $\gamma/2$. Za maksimalno deformacijo pri nategu zato dobimo:

$$\epsilon_{max} = 2\bar{\epsilon} = \gamma = \frac{\delta_t}{2\lambda(n)} \quad (15)$$

oziroma ob lomu:

$$\delta_t = \delta_{t,crit}, \epsilon_{max} = \epsilon_t^* \text{ in } \lambda(n) = \lambda(n)_{crit}$$

tako da je:

$$\epsilon_t^* = \frac{\delta_{t,crit}}{2\lambda(n)_{crit}} \quad (16)$$

Hahn in Rosenfield⁶ sta pri jeklih našla odvisnost $\lambda(n)_{crit} \approx 0,025 n^2$, ako sta širino plastične cone merila v metrih. Izkoristila sta še spoznanje Mc Clintocka⁹, ki je izračunal kritično pravo deformacijo ϵ_t^* , potrebno za koalescenco mikropraznin pri duktilnem tipu nukleacije mikrorazpok. Velja namreč:

$$\epsilon_t^* = \frac{E_T}{3} \quad (17)$$

pri čemer smo z ϵ_T označili pravi lomni raztezek, ki smo ga na osnovi izraza (3) definirali kot:

$$\epsilon_T = \ln \frac{A_0}{A_T} \quad (18)$$

Upoštevaše zvezo med $\lambda(n)_{crit}$ ter eksponentom deformacijskega utrjevanja n , dobimo iz enačbe (17) za $\delta_{t,crit}$ izraz:

$$\delta_{t,crit} = \frac{0,05 \epsilon_T n^2}{3} \quad (19)$$

Ekspirimenti Robinsona in Tetelmana¹⁰ kažejo, da se v pogojih ravninskega deformacijskega stanja odvisnost med δ_t in K_I približuje Dugdalovemu približku:

$$\delta_t = \frac{K_I^2 (1 - \nu^2)}{\alpha E \sigma_{ys}} \approx \frac{K_I^2}{E \sigma_{ys}} \quad (20)$$

S substitucijo izraza (19) za $\delta_{t,crit}$, ko postane K_I enak K_{Ic} , dobimo iz enačbe (20) končno:

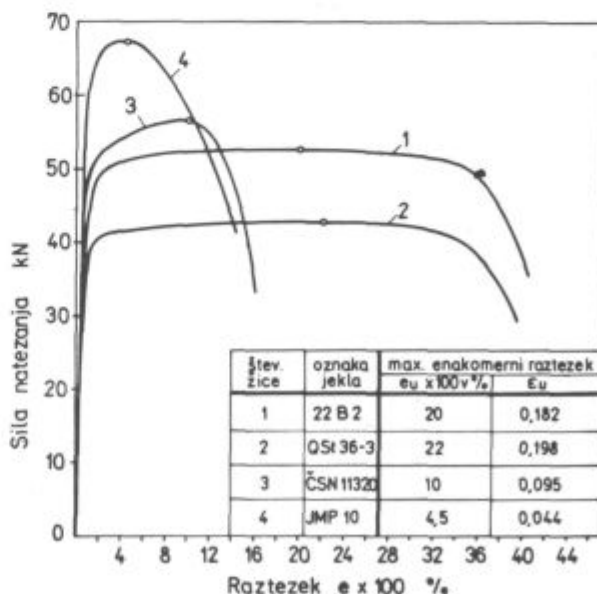
$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{0,05 \epsilon_T n^2 E \sigma_{ys}}{3}} \quad (21)$$

Korelacija (21) je polempirična, izpeljana z upoštevanjem statistično ugotovljene odvisnosti med $\lambda(n)_{crit}$ ter eksponentom utrjevanja n , zato moramo paziti na enote. Ako mejo plastičnosti ter modul elastičnosti izrazimo v MNm^{-2} , dobimo K_{Ic} v $MNm^{-3/2}$.

3. EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Izdelava krivulj tečenja

Za preizkuse smo uporabili štiri različne vrste mehkih žic, izdelanih iz nizkoogljčnih jekel, primernih za preoblikovanje v hladnem. Žica št. 1 je bila iz jekla 22 B 2, torej iz nizkoogljčnega, z borom legiranega jekla, medtem ko je bila žica št. 2 kvalitete QSt 36-3, iz jekla torej, ki ima zaradi nizke vsebnosti ogljika, silicija in žvepla povečano sposobnost preoblikovanja v hladnem. Obe žici sta bili ustrezno sferoidizacijsko žarjeni, saj njuno mikrostrukturo



Slika 4.

Rezultati nateznega preizkusa štirih preiskanih žic iz mehkih jekel

Fig. 4

Results of the tensile tests with four tested soft-steel wires

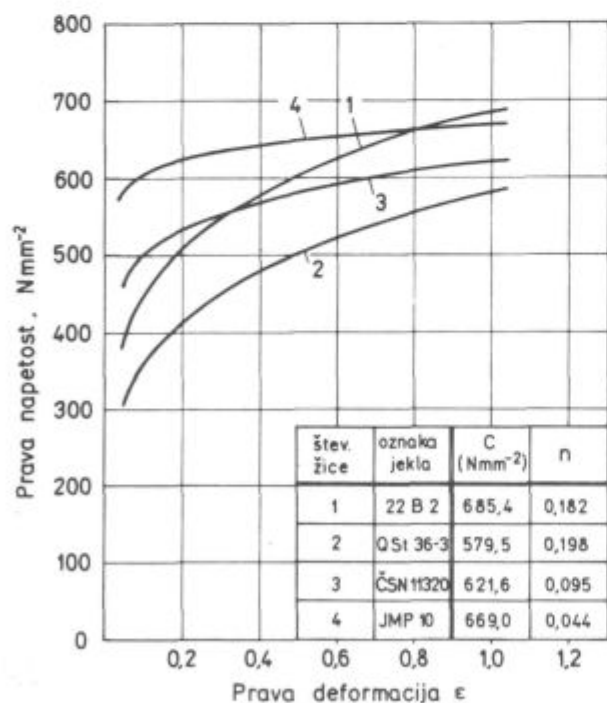
ro sestavlja feritna matica, v kateri je enakomerno razporejen zrnati cementit. Žica št. 3 je bila deklarirana kot kvaliteta ČSN 11320 (po Češkoslovaškem standardu), žica št. 4 pa je bila iz domačega jekla, ki nosi oznako JMP 10. Obe žici sta bili torej izdelani iz nizkoogljivega nelegiranega jekla, JMP 10 ima tudi zelo nizko vsebnost silicija. Vendar pa žici št. 3 in 4 nista bili sferoidizacijsko žarjeni, mikrostrukturo zato sestavlja feritna matica z otočki lamelarnega perlitu.

Rezultati nateznih preizkusov vseh štirih preiskanih žic so zbrani v tabeli I, poleg tega pa še v diagramu na sl. 4. Omenimo naj, da je bil premer vseh štirih žic enak, namreč $\varnothing 12,45$ mm.

Iz značilnih oblik inženirskih diagramov sila—raztezek, prikazanih na sliki 4, lahko zaključimo, da sferoidizacija cementita ter sočasno siromašenje ferita z ogljikom vodi k povečanju maksimalnega dosegljivega enakomernega raztezka ter zmanjšanju trdnosti jekla. Skladno z enačbo (7) se zato poveča eksponent deformacijskega utrjevanja.

Tabela I: Rezultati nateznih preizkusov žic

Štev. žice	Oznaka jekla	Meja plastičnosti Nmm^{-2}	Natezna trdnost Nmm^{-2}	Max. enakomerni raztezek	
				$e_u \times 100$ %	ϵ_u
1	22 B 2	354	419	20	0,182
2	QSt 36-3	293	345	22	0,198
3	ČSN 11320	381	452	10	0,095
4	JMP 10	481	558	4,5	0,044

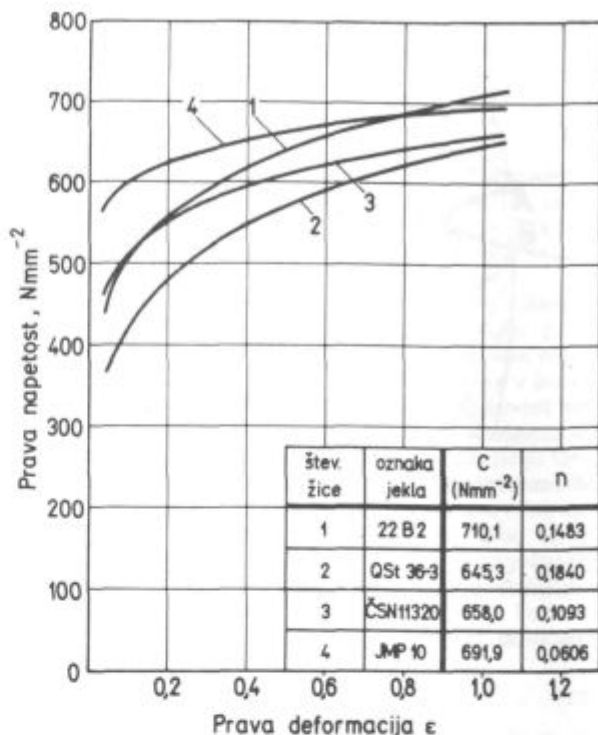


Slika 5.

Krivulje tečenja izračunane na osnovi rezultatov nateznega preizkušanja žic

Fig. 5

Yield stress curves calculated from the results of tensile tests with wires



Slika 6.

Krivulje tečenja izračunane na osnovi rezultatov diskontinuiranih tlačnih preizkusov žic

Fig. 6

Yield stress curves calculated from the results of discontinuous compression tests with wires

V diagramu na sl. 5 so prikazane krivulje tečenja preiskanih žic, izračunane na osnovi rezultatov nateznih preizkusov, upoštevajoč enačbe (7), (9) in (12). Ob tem je potrebno omeniti, da so bile krivulje tečenja v diagramu na sliki 5 izračunane z upoštevanjem le ene same točke (P_{max} , e_u) inženirskega diagrama sila—raztezek, saj je s to karakteristično točko določena tako trdnost jekla, kot tudi meja enakomernega raztezka.

Za primerjavo so v diagramu na sl. 6 prikazane še krivulje tečenja istih žic, tokrat dobljene s pomočjo diskontinuirnega tlačnega preizkusa, po metodologiji, ki je že dolgo v rabi¹¹. Tok krivulj je enak onemu s slike 5, enako je tudi zaporedje žic, namreč njihov medsebojni položaj v diagramu. Podobnost obeh diagramov najbolje dokazuje, da za izdelavo krivulj tečenja poleg diskontinuirnega tlačnega preizkusa enako dobro lahko uporabljamo tudi natezni preizkus. Pri žicah drobnega premera je natezni preizkus sploh edini mogoč.

Manjša odstopanja med obema diagramoma so pa posledica eksperimentalnih napak, ki se vedno pojavljajo, neodvisno od uporabljene metodologije. V tej zvezi naj navedemo le še, da za določevanje krivulj tečenja ni priporočljivo uporabljati kontinuirnega tlačnega preizkusa. Pri kontinuirnem tlačenju se namreč rada pretrga teflonska folija na kontaktnih površinah, kar pripelje do spremenjenih pogojev trenja v teku preizkušanja. Zato dobimo popačenje rezultatov, največkrat previsoke eksponente deformacijskega utrjevanja.

3.2 Določevanje lomne žilavosti jekla

Za določevanje lomne žilavosti smo izbrali jeklo za poboljšanje vrste Č.4734. Iz plošče, debeline 25 mm,

smo izdelali nekaj standardnih CT-preizkušancev, debeline 18 mm, ter nekaj cilindričnih nateznih preizkušancev, premera 10 mm. S kaljenjem v vodi ter popuščanjem pri 360°C je bila dosežena meja plastičnosti 1300 Nmm⁻² ter trdnost jekla približno 1500 Nmm⁻². Kontrola merjenja trdote čez presek CT-preizkušanca so pokazala, da je kaljivost izbranega jekla zadostna ter je dosežena enovita mikrostruktura popuščene martenzita preko vse debeline geometrijsko različnih preizkušancev.

Merjenje lomne žilavosti, skladno s proceduro BS 5447¹² oziroma ASTM E 399-74¹³, je bilo opravljeno na Inštitutu za metalne konstrukcije v Ljubljani, rezultati merjenja pa so v obliki računalniškega izpiska prikazani v tabeli na sl. 7. Dosežena pogojna vrednost K_{IC}, ki je bila pri izbrani debelini CT-preizkušancev kar enaka lomni žilavosti jekla K_{IC}, znaša 56,57 MNm^{-3/2}.

Rezultati nateznega preizkusa, ki je služil za določevanje lomne žilavosti po Hahn-Rosenfeldu, so zbrani v tabeli na sl. 8, za ilustracijo pa je na sl. 9 prikazan še inženirski diagram napetost-deformacija tega nateznega preizkusa.

Začetni premer nateznega preizkušanca je bil, kot rečeno, 10 mm; premer s kontrakcijo zoženega dela preizkušanca v trenutku loma pa je bil 7,2 mm. Z uporabo enačbe (18) dobimo zato za pravi lomni raztezek ϵ_f vrednost:

$$\epsilon_f = \ln \frac{78,53}{40,71} = 0,657$$

K_{IC} -- ASTM STANDARDS

INITIAL CRACK LENGTH		
Initial Crack Length	mm	14
FINAL CRACK LENGTHS		
at 25% Thickness	mm	17.1
at 50% Thickness	mm	17.04
at 75% Thickness	mm	16.5
Minimum Crack Length	mm	14.44
Surface 1 Crack Length	mm	14.84
Surface 2 Crack Length	mm	14.44
CRACK PLANE		
Accepted(1) Rejected(2)	-	1

K _{IC} RESULTS (ASTM) Test: 9			Run no 3
Specimen ID	P17280	Batch	1
Specimen Thickness	17.85 mm	Width	35.7 mm
Specimen Type	CT		
Fatigue Temp	22.00	Deg.C	
Kf	2.446E+01	MPa·m ^{1/2}	
Fatigue Max Load	14.10	kN	
Fatigue Final Peak	9.27	kN	
Fatigue Force Ratio	.0900		
Crack Length	16.88	mm	
Test Temp	22.00	Deg.C	
PQ	2.144E+01	kN	
DK/DT	4.282E+00	MPa·m ^{1/2} /s	
Humidity 56 %	Cycles final	2.5% 3000	
0.2% Proof/Yield Stress	1.280E+03	N/mm ²	
Pmax/Pq	1.0620		
Rsc	.4967		
KQ:	5.657E+01	MPa·m ^{1/2}	

Slika 7.

Računalniški izpis merjenja lomne žilavosti K_{IC} visokotrdnega jekla Č.4734

Fig. 7

Computer record of measured fracture toughness K_{IC} of a high-strength Č.4734 steel

PROOF STRESS RESULTS - RUN NUMBER 8

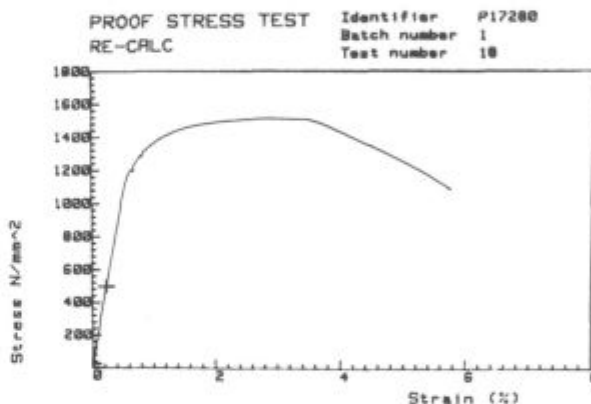
Identification code	P17280	
Batch number	1	
Test number	18	
Elastic Modulus	2.07E+05	N/mm ²
Ultimate Tensile Strength	1.51E+03	N/mm ²
Strain at UTS	3.04E+00	%
Strain at Fracture	5.75E+00	%
Plastic Strain	5.23E+00	%
Energy	7.06E-01	kJ
1st Proof Stress Point	1.19E+03	N/mm ²
2nd Proof Stress Point	1.28E+03	N/mm ²
3rd Proof Stress Point	1.35E+03	N/mm ²

Slika 8.

Rezultati nateznega preizkusa visokotrdnega jekla Č.4734

Fig. 8

Results of tensile test with the high-strength Č.4734 steel



Slika 9.

Inženirski diagram napetost-deformacija nateznega preizkusa visokotrdnega jekla Č.4734

Fig. 9

Engineering stress-elongation curve of tensile test with the highstrength Č.4734 steel

Iz tabele na sliki 8 dobimo za maksimalni enakomerni raztezek ϵ_u (strain at UTS) vrednost 3,04 %. Z enačbo (9) izračunamo maksimalni pravi enakomerni raztezek ϵ_f :

$$\epsilon_f = \ln (1 + 0,0304) = 0,0299,$$

ki je, upoštevajoč enačbo (7), enak eksponentu deformacijskega utrjevanja n.

Iz tabele na sliki 8 odčitamo še modul elastičnosti E, ki znaša 2,07·10⁵ Nmm⁻² ter mejo plastičnosti (2nd Proof Stress Point), ki je enaka 1,28·10³ Nmm⁻².

Na osnovi vseh navedenih vrednosti dobimo, upoštevaje enačbo (21) za K_{IC}:

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{0,05 \cdot 0,657 \cdot 0,0299^2 \cdot 2,07 \cdot 10^5 \cdot 1,28 \cdot 10^3}{3}}$$

$$K_{IC} = 50,9 \text{ MNm}^{-3/2}$$

Izračunana vrednost predstavlja najnižjo med tremi, s Hahn-Rosenfeldovo korelacijo določenimi vrednostmi, saj smo namerili tudi 54,1 MNm^{-3/2}, kar je nedvomno bli-

zu standardni vrednosti $56,57 \text{ MNm}^{-3/2}$. Pri jeklih z visoko trdnostjo ter zato relativno nizko žilavostjo lahko torej dovolj natančno ocenimo lomno žilavost K_{Ic} že na osnovi nateznega preizkusa. Pri manj trdnih, a bolj žilavih jeklih pa je ujemanje slabše, zato moramo v takšnih primerih določati lomno žilavost K_{Ic} po veljavnih standardih^{12, 13}.

4. ZAKLJUČKI

Eksperimenti, opravljeni na osnovi analize nateznega preizkusa, potrjujejo, da poleg običajnih mehanskih lastnosti jekla (meja plastičnosti, trdnost, povprečni enakomerni raztezek ter kontrakcija) lahko z nateznim preizkusom razmeroma enostavno določimo še krivulje tečenja jekla, pa tudi lomno žilavost jekla z visoko trdnostjo. Krivulje tečenja so pomembne pri mehkih jeklih s povečano sposobnostjo preoblikovanja v hladnem, saj njih poznavanje daje tehnologom možnost eksaktnega pristopa k reševanju zahtevnih problemov tehnologije plastičnega preoblikovanja.

Žal natezni preizkus ne odkrije z zadovoljivo selektivnostjo morebitnih napak v materialu, zato moramo za tehnološki preizkus preoblikovalnosti, na primer žice, še vedno uporabljati tudi krčilni preizkus (Stauchversuch). Pri jeklih z visoko trdnostjo ter relativno nizko žilavostjo lahko natezni preizkus uspešno uporabimo za določevanje lomne žilavosti po Hahn-Rosenfeldu. Ta ugotovitev postane pomembna za prakso tedaj, ko so debeline strojnih delov in konstrukcij premajhne, da bi bil pri merjenju lomne žilavosti na iz njih izdelanih preizkušancih izpolnjen pogoj ravninskega deformacijskega stanja.

Zanimivo je, da pri določevanju obeh, sicer povsem različnih značilnosti jekla — namreč preoblikovalne trdnosti ter lomne žilavosti jekla — postane pomemben dosegljivi enakomerni raztezek ϵ_u , ki je enak eksponentu deformacijskega utrjevanja jekla. Pri merjenju lomne žilavosti moramo sicer upoštevati še tudi dejanski lomni raztezek ϵ_L , ki pa ga na posredni način vključuje že kontrakcija jekla. Vsekakor je na osnovi vsega povedanega smiselno beležiti zlasti maksimalni dosegljivi enakomerni raztezek, saj predstavlja pomembno lastnost materiala.

Ne nazadnje predstavlja maksimalni enakomerni raztezek mejo dosegljive plastične deformacije pri enoosnem natezanju, ta deformacija pa je v določeni soodvisnosti z dosegljivimi deformacijami tudi pri drugačnih napetostnih stanjih, tj. pri drugačnih načinih preoblikovanja.

LITERATURA

1. M. Marinček: A rational limit Stated Design Philosophy for Metal Structures, Proceedings of the International Conf. on Steel and Aluminium Structures, Cardiff, 8. to 10. July 1987
2. M. Marinček: Tension and Bend Testing of Aluminium has to be improved, Proceedings of the Third International Conf. on Aluminium Weldments, Munich, F. R. G., 15. to 17. April 1985
3. M. Marinček: Čvrstoća i žilavost osnovnog metala, metala šava i zone uticaja toplote, Zbornik letne škole Mehanika loma zavarenih spojeva, Arandelovac, 25.—29. junij 1984, str. 43—64
4. P. Ludwik: Elemente der technologischen Mechanik, 32, 1909. Berlin, J. Springer
5. J. H. Hollomon: Trans AIME, 1945, 162, 268—290
6. G. T. Hahn, A. R. Rosenfield: Sources of Fracture Toughness — the Relation between K_{Ic} and the Ordinary Tensile Properties of Metals, Applications Related Phenomena in Titanium Alloys, ASTM STP 432, 1968, 5—32, Philadelphia
7. W. W. Gerberich: Plastic Strains and Energy Density in Cracked Plates, Part I, Experimental Mechanics, Vol. 4, 1964, 335
8. H. L. Ewalds, R. J. H. Wanhill: Fracture Mechanics, Edward Arnold Ltd., London 1984
9. F. A. McClintock: A Criterion for Ductile Rupture, povzeto po viru (6)
10. J. N. Robinson, A. S. Tetelman: The Determination of K_{Ic} Values from Measurements of the Critical Crack Tip Opening Displacement at Fracture Initiation, Paper II-421, Third International Conf. on Fracture, Munich 1973
11. K. Kuzman: Uporabnost tlačnega preizkusa za ugotavljanje nekaterih preoblikovalnih lastnosti jekel, Zbornik VII. Savj. proizvod. maš., Novi Sad, 1970
12. ASTM E 399—74: Standard Method of Test for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM Standards, Part 10, 505—524
13. BS 5447: Methods of Test for Plain Strain Fracture Toughness (K_{Ic}) of Metallic Materials, British Standards

ZUSAMMENFASSUNG

Neben der üblichen mechanischen Eigenschaften der Stähle kann man mit dem Zugversuch noch die Verformungsfestigkeit bestimmen, d. h. die Fließkurven von weichen Stählen mit grösserer Verformungsfähigkeit im kalten Zustand, mit der Anwendung der Hahn-Rosenfield Korrelation aber auch die Bruchzähigkeit hochfester Stähle. Zur Berechnung beider sonst ganz verschiedener Eigenheiten von Stahl, nämlich der Verfor-

mungsfestigkeit und der Bruchzähigkeit ist es nötig, die maximal erreichbare Dehnung ϵ_u zu kennen, die gleich dem Exponenten der Verformungsverfestigung von Stahl ist. Da die auf diese Weise definierte Dehnung auch die Grenze der plastischen Verformung bei einachsiger Zugbelastung bestimmt, so kann man sie für eine der wichtigsten plastischen Eigenschaften von Stahl überhaupt betrachten.

SUMMARY

Beside the standard mechanical properties of steel also yield strength, i. e. true stress-strain curves or yield stress curves of soft steel with the increased cold workability can be determined by the tensile test, applying the Hahn-Rosenfield correlation. Even fracture toughness of highstrength steel can be determined in this way.

To evaluate the both steel characteristics which are entirely

different, i. e. yield stress and fracture toughness, the maximal attainable uniform elongation ϵ_u must be obtained, and it is equal to the strain-hardening exponent for steel. Since thus defined elongation determines simultaneously also the limit of attainable plastic deformation in uniaxial tension, it represents one of the most important plasticity characteristics of steel at all.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рядом с условными механическими свойствами сталей можно легко с испытанием натяжения определить также деформационную твёрдость т. е. кривую жидкотекучести мягких сортов сталей с увеличенной способностью преобразования в холодном состоянии, с применением корреляции Nahn-Rosenfield, а также изломную стойкость сталей высокой твёрдости.

Для вычисления обоих данных, хотя весьма различных,

т. е. твёрдости преобразования и стойкости излома относительно сопротивлению разрыва, нам необходимо иметь максимальное равномерное растяжение ϵ_u , которое соответствует показателю деформационному упрочнению стали. Так как таким образом определение растяжения определяет также границу пластической деформации при одноосном напруге, его можно принять за одно из главных примечательных пластических свойств сталей с общей точки зрения.

Zakaj ponovčne peči v jeklarnah

Joža Arh*

UVOD

Ponovčne peči so danes v elektrojeklarnah skoraj nenadomestljive naprave, ne le v proizvodnji kvalitetnih jekel, temveč tudi v vsakdanji proizvodnji masovnih vrst jekel, ker pač zagotavljajo višjo proizvodnjo električne obločne peči in zanesljivo obratovanje kontinuiranih livnih naprav.

Prve ponovčne peči so zgradili zato, da bi izboljšali kvaliteto jekla, povečanje storilnosti je bil vzporeden pojav. Danes je glavni namen povečanje storilnosti v jeklarnah.

Če so prve naprave postavljali v jeklarnah s proizvodnjo kvalitetnih jekel (ASEA — SKF), so jih kasneje gradili v konvertorskih jeklarnah, danes pa ima ponovčno peč že vsaka mini železarna v Evropi.

Ponovčne peči so danes tudi konstrukcijsko dognane, z boljšo kontrolo električnih parametrov, enostavnejše grajene, manjše so izgube toplote s sevanjem, mešanje jekla je boljše, dostop zraka v prostor nad talino je preprečen.

Prvo ponovčno peč sta zgradili firmi Asea in SKF na Švedskem že leta 1965, danes splošno znan kot ASEA — SKF postopek, leta 1967 pa Finkl Mohr v ZDA. Pri teh napravah je slonela rafinacija še na vakuumski degazaciji, mešanje pa je bilo pri ASEA — SKF še elektromagnetno.

Prvo ponovčno peč, kjer rafinacija poteka le preko žilindre, je 1971. leta zgradila firma Daido na Japonskem. Do leta 1981 je samo ta firma zgradila 46 naprav, od tega 80 % nad 50 t oziroma 39 % nad 100 t kapacitete. V ZRN je kar nekaj firm, ki gradijo ponovčne peči. Med najpomembnejšimi so GHH, Fuchs, Mannesman-Demag. Precej ponovčnih peči pa so zgradile železarne same, predvsem kadar je šlo za predelavo EO-peči v ponovčno peč.

Po letu 1980 beležimo hiter porast števila ponovčnih peči. Danes jih je že več kot 200, od tega preko 80 v Evropi, več kot 60 samo na Japonskem. Severna Amerika pa je z blizu 30 napravami daleč zadaj. 75 % vseh teh naprav je v elektrojeklarnah s kapaciteto 20 do 150 t.

Razlogi za hiter porast števila ponovčnih peči so v prvi vrsti dobri metalurški rezultati in zanesljivo vodenje procesa.

O ponovčnih pečeh so prvič poročali v večjem obsegu na prvi evropski konferenci, o elektrojeklarstvu leta 1983. Na drugi evropski konferenci o elektrojeklarstvu oktobra leta 1986 pa je bil govor tako rekoč že o masovni rabi ponovčnih peči v proizvodnji elektrojekla.

ZAKAJ PONOVCNE PEČI

Rekli smo, da so ponovčne peči uporabljali na začetku izključno za proizvodnjo visoko kvalitetnih jekel. Seveda se je s tem tudi skrajšal čas rafinacije, ki je sicer zmanjševala storilnost peči. Že na začetku je bilo očitno, da je mogoče brez izjemno visokih prebodnih temperatur dosegati natančno kemično sestavo, kakor popolnoma nov nivo stopnje dezoksidacije in odžveplanje.

Razvoj ponovčnih peči, kakršnega poznamo danes, pa samo s proizvodnjo specialnih jekel ne bi bil mogoč.

Šele proizvodnja jekla v UHP pečeh, ki naj stalno delajo z enako visoko močjo, je privedla do tehnologije, ko je bilo treba izločiti iz peči rafinacijo jekla. In nazadnje je še razvoj kontinuirnega livanja in stalno iskanje načinov za dviganje storilnosti ter zniževanje stroškov privedlo do hitrega širjenja ponovčnih peči.

Natančna nastavitev temperature livanja je postala absolutna nujnost pri razvoju kontinuiranih livnih naprav z veliko hitrostjo livanja. S tem ko je bila dana možnost ogrevanja jekla v ponovci, temperatura jekla pri preobodu ni več odvisna od temperature livanja. Ponovčna peč tudi zagotavlja toplotno ravnotežje med temperaturo jekla in obzidavo ponovce in s tem omogoča zelo majhno pregretje, kar je ključni dejavnik za kvaliteto jekla.

Sekvenčno livanje je postalo osnovni element pri dvigovanju storilnosti oziroma zniževanju stroškov jeklarn. Ponovčna peč je zato kot vmesni člen med pečjo in kontilivom primarnega pomena, ker deluje kot blažilec.

GLAVNE ZNAČILNOSTI POSTOPKA

Ponovčna peč je danes tisto orodje jeklarjev, ki se po svetu najhitreje širi. Da bi razumeli razloge za takšno ekspanzijo, si oglejmo njene funkcije znotraj evolucije sekundarne metalurgije. Različni cilji ponovčne metalurgije pri različnih napravah so zbrani v tabeli 1.1).

Te cilje lahko razdelimo v tri glavne skupine, ki so medsebojno odvisne:

— Metalurški cilji: kontrola kemične sestave, odstranjevanje neželjenih elementov (H, N, P, O, S), kontrola vključkov modifikacija in zmanjševanje števila vključkov.

— Ogrevanje jekla: nastavitev natančne temperature taline ter homogenizacija temperature in kemične sestave.

— Produktivnost in stroški.

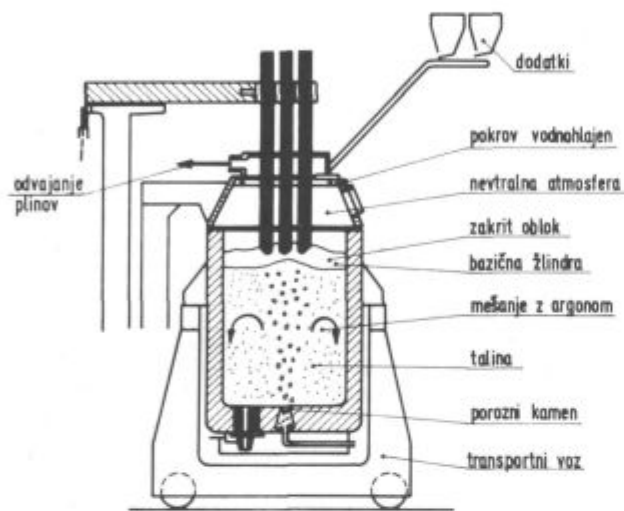
Za doseg teh ciljev mora delovati:

- ogrevanje jekla, električno ali aluminotermično,
- mešanje jekla
- dodajanje legur,
- kontrola atmosfere nad talino,
- vakuumška degazacija.

* Joža Arh, dipl. inž. met. — Železarna Jesenice

Tabela 1

Cilji in oprema	Kontrola homogeniz.	Temperat. ogrevanje	Korekt. sestave	Odstranitev elementov						Kontr. vključkov	Povečanje storiln.
				S	P	H	N	D	C		
Mešanje in legiranje	+	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0
Injektir. CaSi, žlinder	+	0	0/+	0	0	0	0	0	0	+	0
Injektiranje žic	0	0	+	0	+	0	0	0	0	+	0
Ponovna peč	++	++	+	0	0	0	0/+	0	+	+	++
VAD	++	++	++	0	0	0	+	0	++	+	+
VD	++	0	+	0	+	+	++	+	++	+	0
VOD	++	+	+	++	0	+	++	+	0/+	++	0/+
RH/DH	++	0	++	0	++	+	0/++	++	+	+	0/+
				0	++	++	++	++			



Shema ponovne peči

Slika 1:

Shema ponovne peči

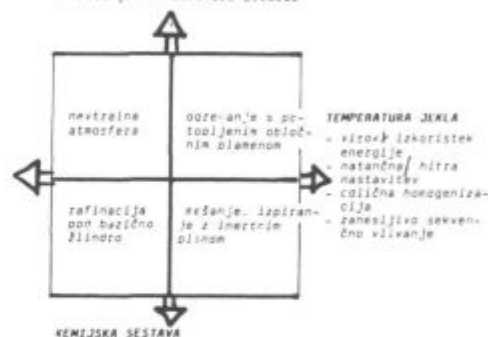
Fig. 1:

Scheme of the ladle furnace

ZNAČILNOSTI PONOVIH PEČI

POVEČANJE STORILNOSTI JEKLANE Z

- odpravo rafinacije
- znižanje temperature preboda



Slika 2:

Štiri glavne značilnosti postopka

Fig. 2:

Basic functions of ladle furnace process

Ponovna peč izpolnjuje vse pogoje, razen vakuumске degazacije, kombinacija z vakuumsko degazacijo pa je skoraj idealna.

Na sl. 1 je shematsko predstavljena ponovna peč. V splošnem sestoji iz jeklene ponovce z bazično obzidavo, ki je pokrita z vodnohlajenim pokrovom. Energijo dovajamo talini s tremi grafitnimi elektrodami. Da zaščitimo ognjestalno obzidavo, naj bodo elektrode potopljene v bazični žlindre. Iz tega razloga lahko vodimo ponovno peč z visokim $\cos \varphi$ in dolgim obločnim plamenom, ki je zakrit z žlindra, pri čemer je izkoriščanje električne energije visoko. Med procesom jeklo stalno mešamo z inertnim plinom, ki ga uvajamo skozi porozni kamen v dnu ponovce, zato da dosežemo dobro razmešanje legiranih dodatkov, kakor tudi enakomerno porazdelitev temperature.

Štiri glavne značilnosti postopka so predstavljene na sl. 2. Te so:

- ogrevanje s pokritim obločnim plamenom, ki ne škoduje obzidavi,
- splakovanje in mešanje taline z inertnim plinom,
- rafinacija pod bazično reducirano žlindra,
- nevtralna ali rahlo reducirajoča atmosfera v prostoru nad talino.

Dobre metalurške rezultate lahko dosegamo le, če so izpolnjeni vsi štirje pogoji hkrati. N. pr.: ogrevanje s pokritim obločnim plamenom je izvedljivo le ob primerni sestavi žlindre in učinkovitem mešanju z inertnim plinom.

V celoti vzeto, s pomočjo ponovne peči dosegamo povečanje storilnosti peči; prvič zato, ker del metalurškega dela, to je rafinacijo, prenesemo v ponovco, in drugič, ker odpade prekomerno ogrevanje taline preko 1700° v peči. Prebodne temperature so najmanj za 50° C nižje kot pri delu brez ponovne peči. Legiranje elementov z visoko afiniteto do kisika lahko poteka brez pristopa kisika, ker sodobne naprave zagotavljajo nevtralno atmosfero v prostoru nad talino.

MOČI TRANSFORMATORJEV

Moči transformatorjev so odvisne od velikosti ponovce, od metalurških zahtev in od maksimalne hitrosti ogrevanja v $^{\circ}$ C/min upoštevajoč izgube, ter se gibljejo med 3 in 30 MVA. Specifične moči transformatorjev znašajo danes okrog 150 kVA/t. Takšna moč pa omogoča ogrevanje s hitrostjo okrog 5° C/minuto. Da pri takšnih, razmeroma močnih transformatorjih ne pride do večje obrabe obzidave, mora biti delilni krog majhen. Premer delilnega kroga je danes manjši od dvakratnega premera elektrod. Iz istega razloga so premeri elektrod majhni, kot je le mogoče, zato je specifična gostota toka precej visoka, okrog 30 Amp/cm².

Pri predelavah električnih obločnih peči v ponovne peči pa transformator z električno opremo ostane, zato so moči transformatorjev pogosto večje, kot so potreb-

ne. Taki transformatorji delajo le s spodnjimi napetostnimi stopnjami.

Pri izbiri transformatorjev je treba upoštevati, da delajo ponovčne peči izključno le s tekočo talino.

Pri takem načinu obratovanja mora biti regulacija zelo natančna in hitra, reagirati mora na zelo majhne diferenčne signale. Površina taline v ponovci je majhna in zato močnejše valovi, po eni strani zaradi mešanja z inertnim plinom in ob dodajanju legiranih elementov ter po drugi strani zaradi različnih lastnosti žlindra. Preprečiti pa je treba naogljčenje taline. Regulacije EO peči, ki jih uporabimo za ponovčne peči, je treba zato modificirati in optimizirati.

KONCEPTI POSTAVITVE NAPRAV 2

Pri načrtovanju ponovčnih peči v prostor je poleg že omenjenih kriterijev, kot je hitrost ogrevanja in metalurške zahteve, treba upoštevati tudi prostorske razmere. Pomembno je vedeti, kako bomo spravili ponovco pod ponovčno peč, kje jo sploh postaviti, kako je z žerjavi, kje bodo legirne naprave, kako priključiti odsesavanje plinov, ali je mogoča še dodatna sekundarna obdelava, n. pr. z injektiranjem prašnatih materialov, in podobno. Vse te predpostavke in zahteve so privedle do različnih izvedb teh naprav.

IZVEDBA S STACIONARNO PLOŠČADJO

Od EO peči znani odmični portal z ogrodjem za nosila elektrod in ogrodjem za obešenje pokrova je tu montiran direktno na tla temelja brez priprave za vrtenje. V takem primeru mora ponovca ležati v vozu, s katerim jo prevažamo pod elektrode. Ta izvedba je primerna takrat, kadar lahko prevažamo ponovco na vozu med EO pečjo in ponovčno pečjo, s čimer si prihranimo čas za prestavljanje ponovce z žerjavom. Ker v primeru te izvedbe odpade vrtenje portalov, so kabli lahko mnogo krajši, kot pri EO pečeh. Opisana izvedba pride v poštev zlasti pri velikih ponovcah z veliko priključno močjo.

PNOVČNE PEČI Z ODMIČNO PLOŠČADJO

V primeru, kadar moramo postaviti ponovco z jeklom pod elektrode z žerjavom, pride v poštev le izvedba z vrtljivo ploščadjo.

Možne so še druge izvedbe. Tako že obratuje naprava za ogrevanje jekla v ponovci na vrtljivem stolpu naprave za kontinuirano livanje. Namenjena je predvsem pokrivanju toplotnih izgub pri dolgih časih livanja. Do neke mere pa je možno tudi pregrevanje taline. Naprava je grajena tako, da jo lahko obračamo za kot $\pm 175^\circ$, zaradi česar lahko izmenično ogrevamo tudi ponovco, ki čaka na livanje. Takšna naprava zagotavlja veliko zanesljivost pri sekvenčnem livanju.

Znana je izvedba z vrtljivim krožnikom pri DDS na Danskem. Omogoča hitro menjavo ponovc, ker je ena ponovčna peč namenjena za obdelavo jekla iz dveh EO peči.

METALURGIJA PROCESA

Metalurgija procesa je odločilna za uspeh. Oksidne žlindre se je treba znebiti, bodisi s prebodom brez žlindre, kar je najceneje, ali s posnemanjem.

Osnovni pogoji za ponovčno metalurgijo je sestava bazične žlindre, ki ščiti jeklo proti atmosferi, ščiti obzidavo ponovce pred obločnim plamenom in veže produkte rafinacije. Sestavljena mora biti tako, da je hitro tekoča. Jedavcu se je pri tem treba izogibati, ker najeda ognjestalno oblogo.

DEZOKSIDACIJA JEKLA

Za običajni dvožlindrni postopek je značilna obarjalna dezoksidacija z aluminijem, pri kateri nastaja velika količina aluminatnih vključkov, ki se jih vseh ne da odstraniti.

Pri ponovčni metalurgiji pa spet prihaja do izraza difuzijska dezoksidacija, kakršno je poznal že Perrin, ki je leta 1933 patentiral svoj znameniti postopek dezoksidacije s staljeno žlindro, sestave $\text{CaO} = 45\%$, $\text{SiO}_2 = 22\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 33\%$. Na teh osnovah je slonela rafinacija v majhnih EO pečeh vse do petdesetih let, ko so začeli graditi velike EO peči z veliko globino taline, ko difuzijska dezoksidacija ni bila več dovolj učinkovita in hitra.

Za difuzijsko dezoksidacijo velja razmerje

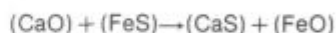
$$L_{\text{FeO}} = \frac{a(\text{FeO})}{a(\text{O})}$$

To pomeni, da moramo, če želimo znižati vsebnost kisika v jeklu, znižati najprej vsebnost (FeO) v žlindri. Ponovčne peči so prav za ta način dezoksidacije posebej primerne. Žlindra je ves čas dovolj vroča, ker jo ogrevamo z obločnim plamenom, zato jo lahko poljubno popravljamo in kontroliramo po videzu, na pogled. Siva barva pomeni prisotnost železovega in manganovega oksida. Ko barva žlindre postane svetla ali bela, pomeni, da je jeklo dezoksidirano. Vsebnost FeO v žlindri naj doseže pod 1 %.

Z intenzivnim mešanjem taline z inertnim plinom ves čas dovajamo pod žlindro svežo talino in tako reakcije rafinacije pospešujemo. Difuzijska dezoksidacija je torej zagotovilo za doseganje majhne vsebnosti kisika v jeklu in s tem boljše čistoče jekla.

ODŽVEPLANJE JEKLA

Odžveplanje je vedno tesno povezano z dezoksidacijo, kar izhaja iz znane enačbe



oziroma konstante ravnotežja

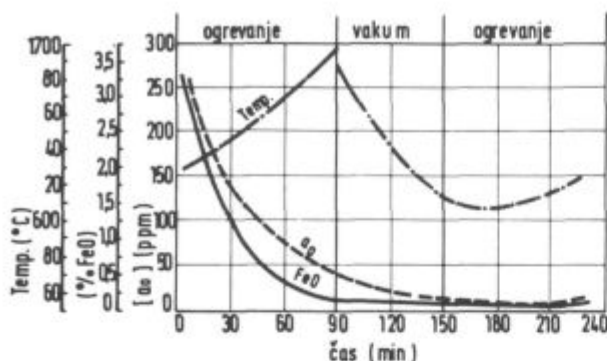
$$K = \frac{a_{\text{CaS}} a_{\text{FeO}}}{a_{\text{CaO}} \times a_{\text{FeS}}}$$

Tako kakor se v času procesa znižuje vsebnost FeO v žlindri, raste tudi stopnja odžveplanja. Pri tem je treba poskrbeti za takšno sestavo žlindre, ki bo imela visoko sulfidno kapaciteto.

Stopnja odžveplanja je odvisna od intenzivnosti mešanja in narašča z naraščanjem energije mešanja. Dodatno mešanje z inertnim plinom na meji med žlindro in jeklom s kopjem od zgoraj povečuje stopnjo odžveplanja.

Za stopnjo odžveplanja navajajo različne vrednosti, odvisno od vrste jekla (% C), v splošnem pa se giblje od 65 do 85 % po vsaj 30-minutni obdelavi.

Za uspeh rafinacije je ključnega pomena kontrola atmosfere nad talino. Od tega sta odvisni čistoča in stopnja odžveplanja. Infiltracija zraka med pokrovom in ro-



Slika 3:

Prikaz gibanja temperature, aktivnosti kisika v talini in FeO v žilindri med rafinacijo v ponovci 3)

Fig. 3:

Temperature and oxygen activity of the melt and ironoxide content of the slag during the ladle refining process. 3)

bom ponovce je s tesnjenjem treba preprečiti. Če to ni doseženo, se stopnja odžveplanja zmanjša za polovico.

Kaj se da dosežati v kombinaciji ponovna peč in desoksidacija v vakuumu kaže sl. 3. Stopnja odžveplanja v času prvega ogrevanja je okrog 50 %. Ko je dosežena temperatura 1680—1690°C prenesejo ponovco v vakuumsko komoro pri čemer se aktivnost kisika v talini in FeO v žilindri še dalje znižuje. Degazacija v vakuumu naj traja vsaj 15 minut. Po taki obdelavi je dosežena aktivnost kisika od 10—15 ppm in 0,2 do 0,3 % FeO v žilindri.

Če je potrebno še nadaljnje odžveplanje ali korektura analize, ponovco ponovno prenesemo na ogrevno mesto.

Takšen način obdelave uporabimo za doseganje ekstremno nizkih vrednosti kisika in žvepla.

Na Jesenicah že imamo vakuumski napravi v obeh Jeklarnah, zato bodo takšne najbolj zahtevne obdelave možne.

PRIKAZ POSTOPKA 1

Poglejmo, kaj lahko dosežemo s tipično moderno 100 t ponovno pečjo, ki dela v 40-minutnem ciklu pri atmosferskem pritisku:

- Hitrost ogrevanja po tem, ko je doseženo toplotno ravnotežje: 5°C/min.
- Nastavitev temperature: ±4°C natančno
- Poraba električne energije: 30/40 kWh/t
- Poraba elektrod 8/10 g/kWh.
- Naogljčenje: 1 do 1,5 ppm/minuto ogrevanja pri mešanju s plini in 0,8 do 1 ppm/minuto pri induktivnem mešanju
- Stopnja odžveplanja 65 do 85 % po 30-minutni obdelavi
- Skupna vsebnost kisika 10 do 50 ppm, odvisno od vrste jekla, načina dezoksidacije (Si ali Al) in tesnosti ponovce.
- Prirastek dušika: manj kot 5 ppm
- Prirastek vodika: manj kot 1 ppm, vendar je to močno odvisno od redukcije žilindre
- Prirastek fosforja od 5 do 50 ppm, odvisno od ostanka žilindre v ponovci
- Povečanje storilnosti: za mini železarno s KL za gredice okrog 9 do 13 %.

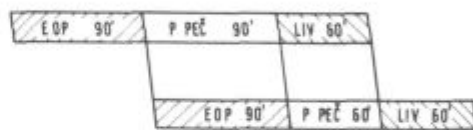
KAJ PRIČAKUJEMO OD PONOVCNE PEČI

V jeklarni 2 je bila že s samim projektom predvidena VAD naprava. Danes bi se odločili za ločeni napravi, posebej za VD/VOD napravo, ki jo že imamo, in posebej za ponovno peč. Takšna kombinacija je cenejša in bolj praktična.

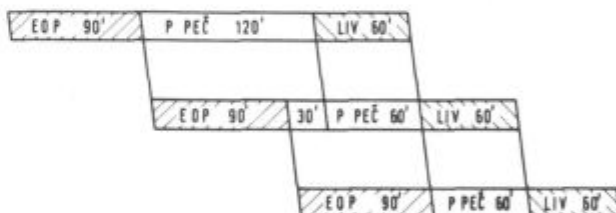
Predvsem za celotni proizvodni program ne potrebujemo vakuumske obdelave jekla. Pri jeklih, kjer plini (H, N) niso problem in kjer ni potrebno razogljčenje, je obdelava v ponovni peči cenejša. To pa je pri nas pretežno ves program navadnih konstrukcijskih jekel.

Ponovna peč pomeni večjo ekonomičnost in večjo zanesljivost pri obratovanju konti liva. S ponovno pečjo pa bo mogoče vlivanje vsaj dveh šarž v sekvenci, kar je ključnega pomena pri zniževanju stroškov. Kako bi bilo to videti pri vlivanju treh šarž v sekvenci, pa je razvidno s sl. 4. Zanesljivo vlivanje dveh ali treh šarž v sekvenci omogoča le ponovna peč.

2 šarži v sekvenci



3 šarže v sekvenci



Slika 4:

Prikaz izdelave šarž, EO peč ponovna peč, KL pri sekvenčnem livanju dveh in treh šarž

Fig. 4:

Scheme of the production process arc furnace, ladle furnace and continuous casting of two or three melts in sequence

Imeti ponovno peč pomeni izdelati kvalitetno jeklo, doseči toplotno ravnotežje med talino in obzidavo, s čimer so lahko temperature jekla na skrajni spodnji meji in nastavljene v zelo ozkih tolerancah, tudi samo ±3°C. To pa dalje pomeni tudi možnost hitrejšega vlivanja, predvsem pa bolj čisto jeklo in lepšo površino.

V jeklarni 1 bi postavitev ponovne peči pomenile:

- povečanje storilnosti z odpravo rafinacije v peči in zaradi znižanja prebodnih temperatur,
- znižanje stroškov z manjšo porabo energije in elektrod (krajši čas od preboda do preboda), boljša vzdržnost obzidave,
- večja zanesljivost pri kontinuirnem livanju — odpadejo vrnjene šarže,
- boljša kvaliteta jekla — možnost direktnega valjanja gredic brez čiščenja.

OBZIDAVA PONOVC

Ponovce so do nivoja žindre obzidane ali aluminatno ali pa z dolomitno opeko (keramično vezani dolomit). V žilindrni coni uporabljajo krommagnezitne opeke z do-

datkom C. Vzdržnost; obzidave so boljše kot pri VOD obdelavi.

Porozni kamni v dnu so navadno z usmerjeno poroznostjo, ker sta večji tako zanesljivost kot prepustnost za plin.

LITERATURA

1. H. Legrand, Sofresid — Pariz, Zbornik konference o sekundar, metalurg., Aachen 1987, 449—454
2. J. Druppel R 5 1/5 PART I EEC 86
3. W. Meyer VEW AG Kapfenberg, Zbornik konference o sekundarni metalurgiji, Aachen 1987, 162

VSEBINA

UDK 669.14.018.5

ASM/SLA: ST-f

Metalurgija — dinamo jeklo

B. Koroušič, J. Triplat, J. Arh

Sodobna tehnologija izdelave dinamo jekel po duplex postopku EOP+V (0) D

Železarski zbornik 22(1988)2 s 43—49

Opisani so rezultati raziskav na področju optimizacije proizvodnje dinamo jekel po kombiniranem postopku EOP+V(0)D v Železarni JESENICE.

Težišče raziskav je bilo na procesih, ki potekajo med vakuumsko obdelavo jekla. Opisani so rezultati sistematičnih meritev aktivnosti kisika s kisikovo sondo ter spremljanja kemične sestave tekočega jekla in žilindrov. V analizo so vzete vse pomembne faze kot so: vakuumska oksidacija ogljika, legiranje, degazacija in odžveplanje jekla.

Posebna pozornost je posvečena fazi legiranja in fazi razplinjavanja oziroma razžveplanja taline, kar je zelo pomembno za doseg nizke vsebnosti plinov in žvepla.

Na kratko je predstavljen računalniški program VODES, ki omogoča učinkovito pripravo kompletne tehnologije od preboda iz EA-peči do litja.

Avtorski izvleček

UDK: 620.172.087.21

ASM/SLA: Q27a

Metalurgija — preiskave materiala — natezni preizkus

B. Ule, J. Vojvodič-Gvardjančič, Š. Strojnik in K. Kuzman

O manj znanih aspektih nateznega preizkusa

Železarski zbornik 22(1988)2 s 51—57

Poleg običajnih mehanskih lastnosti jekla (meja plastičnosti, trdnost, kontrakcija ter povprečni lomni raztezek) lahko z nateznim preizkusom razmeroma enostavno določimo še krivulje tečenja jekel ter lomno žilavost jekel z visoko trdnostjo.

Izkaže se, da moramo za določevanje tovrstnih lastnosti jekla poznati maksimalni logaritemski enakomerni raztezek, ki je enak eksponentu deformacijskega utrjevanja jekla. Tako definiran raztezek predstavlja pomembno lastnost materiala.

Avtorski izvleček

UDK: 621.365.669.041

ASM/SLA: D5, W18S, A5f

Metalurgija — elektroobločna peč — optimiranje delovanja

Janez Bratina

Elektroobločna peč danes

Železarski zbornik 22(1988)2 s 29—41

Prikazane so elektrotehniške in elektroenergetske karakteristike elektroobločne peči za proizvodnjo jekla glede na pogoje obratovanja v elektroenergetskem napajalnem omrežju in glede na racionalno izrabo električne moči. Opisane so metode podajanja realnih stanj elektrotehničnih parametrov, s pomočjo katerih so mogoči točnejši elektroenergetski obračuni stanj v peči in s tem omogočeno njeno eksaktnejše vodenje. Izvršene so primerjave energijskih in toplotnotehniških posebnosti običajne (Regular Power) in močnostne (Ultra High Power) peči, ki kažejo, da se v modernih močnostnih pečeh dosega ob vedno večji proizvodnosti tudi vedno večja izraba električne energije, saj dosega delež električne energije v skupno porabljeni energiji v elektroobločni peči že manj kot je njena teoretska potreba. Optimiranje obratovanja elektroobločne peči ni omejeno zgolj na določitev posebnih realnih obratovalnih stanj (maksimalna moč na loku, maksimalni energijski izkoristek), temveč je razširjeno na določitev stroškovno optimalnega obratovanja. Prikazani energijski in stroškovni obračuni omogočajo energijsko in stroškovno optimiranje raznih tehnoloških postopkov oziroma njih vrednotenje. Dobljeni rezultati takega optimiranja potrjujejo pravilnost obratovanja klasične močnostne elektroobločne peči pri nizkih faznih faktorjih, oziroma pravilnost obratovanja moderne močnostne peči z vodnohlajenimi paneli, ki obratuje s faznimi faktorji nad 0.82.

Avtorski izvleček

INHALT

UDK: 620.172.087.21

ASM/SLA: Q27a

Metallurgie — Untersuchungen von Stoffeigenschaften-Zugversuch

B. Ule, J. Vojvodič-Gvardjančič, Š. Strojnik und K. Kuzman

Etwas über die weniger bekannten Aspekte des Zugversuches

Železarski zbornik 22(1988)2 S 51—57

Neben der üblichen mechanischen Eigenschaften der Stähle (Streckgrenze, Festigkeit, Brucheinschnürung und die durchschnittliche Bruchdehnung) kann man mit dem Zugversuch verhältnismässig leichter noch die Fließkurven der Stähle, so wie die Bruchzähigkeit der hochfesten Stähle bestimmen.

Für die Bestimmung diesartiger Eigenschaften von Stahl ist es nötig die maximale gleichmässige logarithmische Dehnung zu kennen, welche gleich dem Exponenten der Verformungsverfestigung von Stahl ist. Auf diese Weise definierte Dehnung, stellt eine wichtige Stoffeigenschaft dar.

Auszug des Autors

UDK: 669.14.018.5

ASM/SLA: ST-1

Metallurgie — Dynamo Stahl

B. Koroušič, J. Triplat, J. Arh

Moderne Technologie der Erzeugung von Dynamo Stahl nach den Duplex Verfahren LBO + V (0) D

Železarski zbornik 22(1988)2 S 43—49

Im Artikel werden die Ergebnisse der Untersuchungen auf dem Gebiet der Optimierung der Erzeugung von Dynamo Stahl nach dem kombinierten Verfahren LBO-V (0) D im Hüttenwerk Jesenice beschrieben. Im Schwerpunkt der Untersuchungen waren die Prozesse, welche während der Vakuumbehandlung von Stahl verlaufen. Ergebnisse der systematischen Sauerstoffaktivitätsmessungen mit der Sauerstoffsonde so wie die Verfolgung der chemischen Zusammensetzung von Stahl und der Schlacke werden beschrieben. Analysiert werden alle wichtigen Phasen wie: die Vakuumenkohlung, das Legieren, die Entgasung und die Entschwefelung von Stahl.

Besondere Aufmerksamkeit wird der Legierungsphase, der Entgasung und der Entschwefelung der Schmelze gewidmet, was für die Erzielung niedriger Wasserstoff und Schwefelgehalte von besonderer Wichtigkeit ist.

Ganz kurz wird der Rechnerprogramm VODES vorgestellt, welcher eine effektive Vorbereitung der komplexen Technologie vom Abstieg aus dem LB Ofen bis zum Giessen möglich macht.

Auszug des Autors

UDK: 621.365.669.041

ASM/SLA: D5, W18S, A5f

Metallurgie — Lichtbogenofen — Betriebsoptimierung

Janez Bratina

Der Lichtbogen-Schmelzofen heute

Železarski zbornik 22(1988)2 S 29—41

Elektrotechnische und elektroenergetische Eigenheiten des Lichtbogen-Schmelzofens zur Erzeugung von Stahl in Hinsicht auf die Betriebsbedingungen im elektroenergetischen Speisungsnetz, und in Hinsicht auf eine rationelle Ausnutzung elektrischer Leistung werden gezeigt. Die Methoden für die Angaben reeller Zustände elektrotechnischer Parameter werden beschrieben, mit deren Hilfe genauere elektrotechnische Berechnungen der Zustände im Ofen möglich sind, und damit eine genauere Führung des Ofens. Vergleiche energetischer und wärmetechnischer Besonderheiten eines üblichen (RP) und eines Hochleistungs-Lichtbogenofens (UHP) sind durchgeführt worden und zeigen, dass in den modernen Hochleistungs-Lichtbogenöfen neben höherer Produktivität auch immer grössere Ausnutzung von elektrischer Energie erreicht wird, denn der Anteil von elektrischer Energie im Gesamtenergieverbrauch vom Lichtbogen-Schmelzofen wird schon kleiner, als der theoretische Energiebedarf für das reine Schmelzen ist. Die Optimierung des Schmelzvorganges ist nicht nur auf die Bestimmung besonderer reeller Betriebszustände (maximale Leistung am Lichtbogen, maximale Energieausnutzung) beschränkt, sondern breitet sich aus auf die Bestimmung der kostenoptimalen Betriebsführung.

Die Energie und Kostenberechnungen machen eine Optimierung der Energieführung und der Kosten verschiedener technologischer Verfahren, bzw. deren Bewertung möglich. Die erhaltenen Ergebnisse solcher Optimierung bestätigen die Richtigkeit der Ofenführung eines klassischen Ofens normaler Leistung bei niedrigem Leistungsfaktor, bzw. die Richtigkeit der Ofenführung eines Modernen Hochleistungs-Lichtbogen-Schmelzofens mit wassergekühlten Wandelementen bei hohem Leistungsfaktor über 0,82.

Auszug des Autors

CONTENTS

UDK: 669.14.018.5

ASM/SLA: ST-1

Metallurgy — Dynamo-sheet steel

B. Koroušić, J. Triplat, J. Arh

Modern Technology of Manufacturing Dynamo-Sheet Steel by the Duplex EAF+V (0) D Process

Železarski zbornik 22(1988)2 P 43—49

Paper presents the results of investigations to optimize the manufacturing dynamo-sheet steel by the duplex EAF+V (0) D process in the Jesenice Steelworks.

Emphasis in the investigations was on processes taking place during the vacuum treatment of steel. Results of systematic measurements of oxygen activities by oxygen probe, and of following the chemical composition of molten steel and of slag are presented. All the important steps as vacuum oxidation of carbon, alloying, degassing, and desulphurisation of steel were analyzed.

A special attention was given to the step of alloying and to the degassing step beside the desulphurisation step in order to reduce contents of gases and of sulphur.

The computer program VODES is shortly presented. It enables the efficient preparation of complete process technology from tapping the EA furnace to casting.

Author's Abstract

UDK: 620.172.087.21

ASM/SLA: Q27a

Metallurgy — Material Testing — Tensile Test

B. Ule, J. Vojvodič-Gvardjančič, Š. Strojnik in K. Kuzman

On Less Known Aspects of Tensile Test

Železarski zbornik 22(1988)2 P 51—57

Beside the standard mechanical properties of steel (yield strength, strength, contraction, and mean elongation at rupture) also true stress-strain or yield stress curves of steel and fracture toughness of high-strength steel can be relatively simply determined by the tensile test.

It was found that these steel properties can be determined if the maximal logarithmic uniform elongation is known, and it is equal to the power in the strain-hardening exponent for steel. Thus defined elongation represents an essential material property.

Author's Abstract

UDK: 621.365.669.041

ASM/SLA: D5, W18S, A5f

Metallurgy — Electric arc furnace — Optimization of operation

Janez Bratina

Electric Arc Furnace Today

Železarski zbornik 22(1988)2 P 29—41

Electroenergetic characteristics of the furnace, their influence on the electric power supply network, and operational conditions in respect to rational use of electric power in the power system are presented. The methods to present real states of electrotechnical parameters which enable more accurate electroenergetic accounts of states in the furnace, and thus its more exact operation, are described. Made comparisons of energy and heat-engineering characteristics of a regular-power and ultrahigh-power furnace show that modern ultra-high-power furnaces enable even higher yield of electric energy at the even increased furnace output. The portion of electric energy in the overall consumed energy in the arc furnace is already below the theoretical need for melting itself. Optimizing the operation of furnace is not limited only to determining the special real operational states (maximal arc power, maximal energy yield) but it is extended also to the determination of the optimal-cost operation. Presented energy and cost accounts enable the energy and cost optimization of single operational steps and their evaluation. The obtained results of such an optimization confirm that correct operation of standard ultra-high-power arc furnace is at low $\cos \phi$, and correct operation of modern ultra-high-power furnace with water-cooled panels operating with $\cos \phi > 0.82$.

Authors Abstract

СОДЕРЖАНИЕ

UDK: 620.172.087.21

ASM/SLA: Q27a

Металлургия — исследование материала — испытание растяжением

В. Уле, Ј. Војводић-Гвардјанчић, Ђ. Стrojник, К. Кузман

О менее известных аспектов испытания растяжением

Železarski zbornik 22(1988)2 С 51—57

Рядом с обыкновенных механических свойств стали (кажущийся предел текучести, вязкость, сокращения, а также среднее значение растяжения излома (можно легко с испытанием растяжения определить также ещё кривую литья сталей и изломную стойкость сталей, которые показывают высокую твёрдость.

Оказывается, что для определения свойств этого вида стали необходимо знать максимальный логарифмическое равномерное растяжение, которое соответствует показателю деформационного упрочнения стали. Растяжение, определенное таким образом представляет собой многозначительное свойство материала.

Автореф.

UDK: 669.14.018.5

ASM/SLA: St-f

Металлургия — динамная сталь

В. Короушић, Ј. Триплат, Ј. Арх

Современная технология изготовления динамных сталей Дуплекс-процессом EOP+V (0) D.

Železarski zbornik 22(1988)2 С 43—49

В статье дано описание результатов исследования в области оптимизации производства динамных сталей комбинированным способом EOP (электр. дуговая печь) — V (0) D (обработка в вакууме с кислородом) в металлургическом заводе Железарна Есенице.

Центр исследований составляли процессы, которые протекают между обработкой стали в вакууме. Даны результаты систематических измерений активности кислорода, выполняемые с кислородным зондом, также сопроводать содержание химического состава жидкой стали и шлака. Проанализированы также все достопримечательные фазы как нпр: вакуумное окисление углерода, легирование, дегазация и удаление серы из стали.

Особое внимание было посвящено фазе легирования и фазе удаление газов отн. удаления серы из расплава, что весьма достопримечательно для достижения низкого содержания газов и серы в расплаве стали.

Вкратце приведена расчётная программа VODES, которая даёт возможность эффективно приготовить комплексную технологию начиная от выпуска из электродуговой печи до отлива металла.

Автореф.

UDK: 621.365.669.041

ASM/SLA: D5, W18S, A5f

Металлургия — электрическая дуговая печь — оптимизация действия

Janez Bratina

Электрическая дуговая печь сегодня.

Železarski zbornik 22(1988)2 С 29—41

Приведены электротехнические и электроэнергетические данные электродуговой печи для производства стали с точки зрения на условия эксплуатации в электроэнергетической сети питания и, что касается на рациональное использование электрической мощности. Дано описание методов подачи реального состояния электротехнических параметров, при помощи которых есть возможность выполнить более точный электроэнергетический расчёт состояние в печи и, таким образом, возможность для более эффективный режим работы печи. Выполнены сравнения энергетических и теплотехнических особенности обыкновенной (Regular Power) и более крупной печи (Ultra High Power), которые указывают, что в современных печах большой мощности можно всегда получить высокую производительность и также лучшее использование электрической энергии; оказалось, что доля электрической энергии в совокупной расходуемой энергии в электрической дуговой печи уже меньше чем её теоретическое требование. Наиболее благоприятная работа электродуговой печи не ограничена только на определение отдельных благоприятных состояний работы, но оно распространено на определение благоприятного значения расхода работы электропечи.

Приведенный энергетический расчёт и расчёт расходов дают возможность сопроводать самые благоприятные технологические способы относительно их оценки. Полученные результаты такого благоприятного состояния подтверждают правильность работы классической электрической дуговой печи большой мощности при низких коэффициентов сопряжённости фаз, относительно правильности работы современной электродуговой печи с лавелями на охлаждение водой, которая работает с фазовой постоянностью свыше 0,82.

Автореф.