

POVIJEST KEMIJE I KEMIJSKOG INŽENJERSTVA

Svjetska proizvodnja čelika u razdoblju od 2000. do 2020. godine

M. Gojić,* I. Ivanić i D. Knežević

This work is licensed under a
Creative Commons Attribution 4.0
International License

Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Aleja narodnih heroja 3, 44 000 Sisak

Sažetak

Ovaj rad prikazuje trend proizvodnje sirovog čelika u svijetu u prva dva desetljeća 21. stoljeća. U razdoblju od 2001. do 2020. godine svjetska proizvodnja čelika kontinuirano raste (ukupno je proizvedeno 28,5 Gt čelika) uz smanjenje u 2008. (1,6 %) i 2009. godini (7,7 %) zbog globalne financijske i gospodarske krize. Više od pedeset godina čelik se primarno proizvodi pomoću dviju tehnologija: oksidiranjem sirovog željeza (produkt visoke peći) u kisikovim konvertorima pomoću tehničkog kisika te pretaljanjem starog željeza (čelični otpad) u elektrolučnim pećima. Za proizvodnju kvalitetnijih čelika sve veću ulogu imaju postupci sekundarne metalurgije (dorada čelika u loncu). U 2000. godini u svijetu je proizvedeno 847,2 Mt (udio u kisikovim konvertorima od 58,2 %, a u elektrolučnim pećima od 33,8 %), dok je tijekom 2020. godine proizvedeno 1877,5 Mt čelika, što je porast od 2,2 puta. S obzirom na postupke proizvodnje u 2020. proizvedeno je 73,2 % čelika u kisikovim konvertorima, 26,3 % u elektrolučnim pećima, 0,3 % u Siemens-Martinovim (SM) pećima i 0,2 % ostalim postupcima. Primat proizvodnje čelika je u državama (73,9 % svjetske proizvodnje) i tvrtkama iz Azije. Stupanj recikliranja čelika u razdoblju 2011. – 2019. iznosio je 34 – 37 %. Kina je najveći svjetski proizvođač čelika (od 1996. godine). U razdoblju 2000. – 2020. povećala je proizvodnju čelika za 8,3 puta (sa 127,2 na 1064,8 Mt). Kina je u 2020. godini proizvela 56,6 % svjetske proizvodnje čelika. U razdoblju od 2000. do 2020. godine udio kontinuiranog lijevanja čelika je povećan za oko 10 %, s 87 na 96,6 %.

Ključne riječi

Čelik, bazični kisikov konvertor, elektrolučna peć, sirovo željezo, čelični otpad, kontinuirano lijevanje

1. Uvod

Upotreba metalnih materijala započela je još u davnoj povijesti.¹ Razvoj civilizacije u uskoj je vezi s razvojem metalnih materijala, o čemu svjedoče vremenska razdoblja ljudske civilizacije nazvana po metalu koji se najviše upotrebljavao (bakreno, brončano i željezno doba). S obzirom na značenje čelika,^{2–8} svjetsku proizvodnju (treći materijal, iza cementa i drveta) i stupanj recikliranosti, svjetska civilizacija se, unatoč sve većem značenju i odličnim svojstvima ostalih materijala (polimeri, staklo, keramika i ostali) još uvijek nalazi u željeznom dobu. Metalni materijali su upotrebljavani za izradu raznih alata, oruđa, oružja itd. koja su uvelike olakšavala opstojnost i svakodnevni život ljudi. Čelik je daleko najvažniji metalni materijal. U 2000. godini svjetska proizvodnja čelika bila je 26 puta veća od proizvodnje primarnog aluminija (najbliži metalni materijal čeliku po godišnjoj proizvodnji), a u 2020. godini ta se razlika još i povećala na 28,7 puta.⁹

Čelik se definira kao legura željeza koja sadrži do 2 % mas. udjela ugljika. Budući da su u čeliku osim ugljika sadržani i elementi poput mangana, silicija, kroma, nikla, sumpora, fosfora itd., čelik je i višekomponentna Fe-legura. Čelik je deformabilna i najvažnija legura željeza.^{10,11} Navedeni se elementi, osim ugljika, svrstavaju u primjese čelika. Primjese mogu biti korisne i štetne te uvelike utječu na kvalitetu i svojstva čelika. Elementi poput kroma, mangana, molibdena, nikla itd. korisne su primjese koje znatno poboljša-

vaju ne samo mehanička nego i fizikalno-kemijska svojstva čelika. “Neprijatelji broj 1 i 2” u čeliku su sumpor i fosfor (osim čelika za obradu skidanjem čestica na automatima), a štetni su i plinovi (kisik, vodik, dušik – osim kod nekih mikrolegiranih i nehrđajućih čelika). I tzv. “oligoelementi” (rezidualni elementi) poput bakra, arsena, antimona itd. nepoželjni su (bakar je potreban kod nekih korozivski otpornih čelika) jer znatno narušavaju svojstva krajnjeg proizvoda, posebno čelika namijenjenih dubokom izvlačenju za potrebe automobilske industrije. Sadržaj najvažnijih elemenata u čeliku uvijek se kontrolira i prati, dok se sadržaj ostalih elemenata, ovisno o namjeni i potrebi, povremeno kontrolira.

Od povijesnih vremena, pa sve do danas, upotreba čelika ne gubi na značenju, nego kontinuirano raste. Čelik je materijal prošlosti, sadašnjosti i budućnosti. U 1870. godini svjetska proizvodnja čelika iznosila je oko 500 000 t, od čega se više od polovice proizvodilo u Velikoj Britaniji. U Sheffieldu se u to vrijeme proizvodilo preko 90 % ukupne britanske i 50 % europske proizvodnje čelika. U 1900. godini u svijetu je proizvedeno 28,3 Mt čelika, od čega najviše u SAD-u (36 %) i Velikoj Britaniji (17 %).¹² U prvoj polovici 20. st. prisutan je stalan, ali spor trend rasta proizvodnje čelika. Neposredno prije II. svjetskog rata (1940.) u svijetu je proizvedeno 140,6 Mt čelika.¹³ Činjenica da su se nakon II. svjetskog rata (1951.) zapadnoeuropske države ujedinile u Europsku zajednicu za ugljen i čelik (EZUČ), preteču Europske ekonomske zajednice (1957.) odnosno današnje Europske unije (1993.), dovoljno govori o ulozi i značenju čelika kao materijala. Za nešto manje od 60 godina svjetska proizvodnja čelika povećana je za goto-

* Autor za dopisivanje: Prof. dr. sc. Mirko Gojić, red. prof. u trajnom zvanju, e-pošta: gojic@simet.unizg.hr

vo 10 puta, tj. njegova proizvodnja od 28,3 Mt u 1900. godini povećana je na 274,3 Mt u 1958. godini.⁴ Najzajamjetniji porast proizvodnje čelika zabilježen je u razdoblju 1950. – 1975. kad je ukupna svjetska proizvodnja povećana s 191,6 na 645,4 Mt, tj. za 3,4 puta.¹³ Tijekom 50-ih i 60-ih godina 20. st. proizvodnja čelika povećavana je godišnje oko 5 %. Količina čelika proizvedenog u razdoblju 1970. – 1995. veća je nego ukupna proizvodnja do 1970. godine. Sredinom 70-ih godina 20. st. došlo je do pada proizvodnje čelika u gotovo svim dijelovima svijeta kao posljedica globalne naftne krize. Od 1980. do kraja 20. st. proizvodnja čelika bila je u granicama 663 – 848 Mt, kao posljedica restrukturiranja u tehnološkom, kvalitetnom i regionalnom smislu. U 20. st. u svijetu je ukupno proizvedeno oko 45,6 Gt sirovog čelika.

Krajem hladnog rata došlo je do porasta proizvodnje čelika u Aziji, posebno u Kini, što je kompenziralo nižu proizvodnju čelika u zemljama istočne Europe. Razvijene države se orijentiraju na asortiman s višom kvalitetom, dok "novi" proizvođači uglavnom proizvode masovne čelike. Proizvodnja čelika bitan je segment u metalurgiji u okviru četvrtre industrijske revolucije (4.0).¹⁴

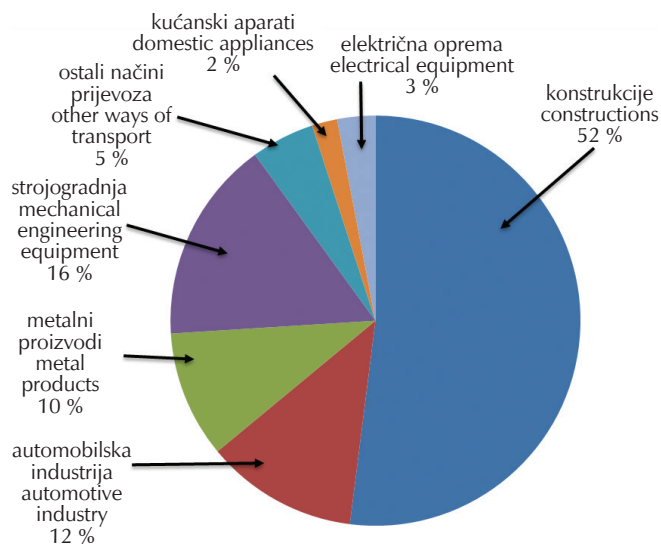
Proizvodnja čelika je oksidacijski proces.^{15,16} Nema čelika bez nastanka troske. Uloga troske je višestruka, a najvažnija je da asimilira neželjene primjese.¹⁷ Tijekom oksidacije željeza i primjesa nastali oksidi prelaze u trosku koja može biti i koristan sporedni proizvod.^{18–23} Troska nastaje i od drugih dodataka uloženi u proizvodne agregate (npr. vapno i dr.), erozije kao posljedice reakcije taline s vatrostalnom oblogom proizvodnog postrojenja itd.

2. Uloga i značenje čelika u nacionalnom gospodarstvu

Čelik je najvažniji konstrukcijski materijal s ukupnom svjetskom proizvodnjom u razdoblju 1900. – 2020. od 74,1 Gt.¹³ Kao univerzalan materijal primjenu je našao u gotovo svim područjima ljudskih djelatnosti poput građevinske, automobilske i zrakoplovne industrije, brodogradnje i strojogradnje, medicine itd. Čelik se upotrebljava i pri izradi i obradi drugih materijala. Prema podacima¹³ za 2019. godinu (slika 1) vidi se da se čelik najviše upotrebljava u području konstrukcija (52 %), strojne opreme (16 %) i automobilske industrije (12 %).

Čelik ima veliko područje primjene zbog izvanrednih svojstva koja se mogu na različite načine kombinirati, odnosno prilagođavati uvjetima primjene, tj. dizajnirati izborom odgovarajućeg kemijskog sastava i naknadne obrade.²⁴ Na primjer, čelik može, u usporedbi s drugim materijalima (staklo, keramika i dr.), istodobno biti čvrst i žilav. Odlikuje ga mogućnost oblikovanja deformiranjem, a može se obraditi toplinskom i/ili površinskom obradom (postupci modificiranja i prevlačenja površine), međusobna mogućnost spajanja s istim i/ili raznorodnim metalnim materijalima (zavarivanje, lemljenje itd.).

Navedena svojstva čelika određena su svojstvima čistog željeza, pogotovo polimorfijom, načinom djelovanja i masenim udjelom pratećih elemenata. Temeljna svojstva čelika



Slika 1 – Područja primjene čelika u 2019. godini
Fig. 1 – Areas of steel application in 2019

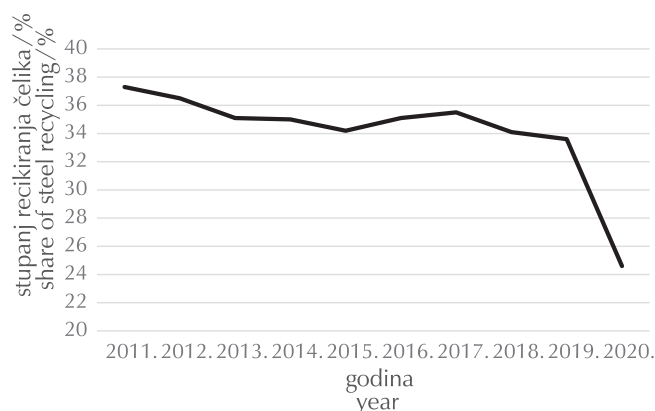
uvjetovana su kemijskim sastavom, mikrostrukturom, oblikom, stanjem i dimenzijama gotovih proizvoda.²⁵ Na primjer, razvoj visokočvrstih čelika u posljednja tri desetljeća doveo je do smanjenja za 25 – 40 % mase čeličnih proizvoda, što je rezultiralo manjim emisijama i nižom potrošnjom energije. Danas, a i ubuduće, gotovo je nemoguće zamisliti život bez proizvoda od čelika.

Čelik ima veliku važnost za nacionalno gospodarstvo, jer ne postoji gospodarska grana u kojoj se ne upotrebljavaju proizvodi od čelika. Jedno od mjerila industrijskog razvoja države je proizvodnja, odnosno potrošnja čelika "po glavi stanovnika". Čelični poluproizvodi i/ili proizvodi prisutni su u raznim oblicima, poput traka, limova, profila, cijevi itd. Oblici i dimenzije prilagođavaju se području primjene. Navedeni čelični poluproizvodi mogu biti topli i hladno valjani, vučeni, kovani, itd. U SAD-u je u posljednjih pet godina potrošnja čelika po "glavi stanovnika" iznosila 250 – 300 kg, a u Njemačkoj 420 – 500 kg.¹³ Proizvodnja čelika zapošljava velik broj djelatnika, uključujući i brojne djelatnosti koje se nastavljaju na proizvodnju čelika, što bitno doprinosi bruto društvenom proizvodu svake države.

Jedna od glavnih karakteristika čelika je mogućnost recikliranja. Čelik je vrlo bitan materijal u kružnom gospodarstvu jer već dugo drži prvo mjesto u recikliranju po opsegu, pa je to i razlog zašto je "zeleni materijal". U tom smislu prednosti proizvodnje čelika su manja potrošnja sirovina i energija, iz čega slijedi i manja emisija "stakleničkih plinova". Krajem 20. st. stupanj recikliranja čelika je iznosio oko 45 % (u 1998. godini uporabljeno je 353,8 Mt starog željeza za proizvodnju čelika).⁶ Prema podacima,¹³ u 2019. godini je oko 630 Mt starog željeza iskorišteno za izradu čelika (1875,1 Mt) uz stupanj recikliranja od 33,6 %, što je smanjilo emisiju CO₂ (oko 950 Mt). Stupanj recikliranja čelika u razdoblju 2011. – 2019. iznosio je 34 – 37 %, uz potrošnju starog željeza od 570 do 630 Mt. U 2020. godini stupanj recikliranja čelika bio je manji i iznosio je 24,6 % čelika (463 Mt utrošeno starog željeza) zbog tržišnih poremećaja uzrokovanih globalnom pandemijom virusom Co-

vid-19 (slika 2). Starim željezom se ne trguje samo lokalno nego i na globalnoj razini (tablica 1).

U 2019. godini EU je ujedno najveći izvoznik i potrošač starog željeza (21,8 Mt).¹³ Najveći uvoznik starog željeza u 2019. godini je Turska (12 Mt). Stupanj recikliranja čelika u industrijski visokorazvijenim državama, odnosno regijama, znatno je viši od svjetskog prosjeka. U 2019. godini u SAD-u je reciklirano 69,1 %, a u EU 55,7 % proizvedenog čelika.¹³



Slika 2 – Stupanj recikliranja čelika u razdoblju od 2011. do 2020. godine

Fig. 2 – Share of steel recycling from 2011 to 2020

Tablica 1 – Najveći korisnici starog željeza za proizvodnju čelika u razdoblju od 2016. do 2020.; vrijednosti su izražene u Mt¹³

Table 1 – Largest users of steel scrap for steel production in the period from 2016 to 2020; the values are expressed in Mt¹³

Država ili regija Country or region	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.
Kina (China)	90,1	147,9	187,8	215,9	220,3
EU	88,4	93,3	90,9	87,5	77,5
SAD (USA)	56,7	58,8	60,1	60,7	50,0
Turska (Turkey)	25,9	30,3	31,1	27,9	30,1
Rusija (Russia)	27,8	29,3	31,8	30,2	29,9
Japan	33,6	35,8	36,5	33,7	29,2
Južna Koreja (South Korea)	27,4	30,7	29,9	28,6	25,8

Proizvodnja čelika je ekološki prihvatljiva jer se znatna pažnja u zadnjih 30-ak godina poklanja zaštiti okoliša u svim proizvodnim fazama počevši od pripreme sirovina, načina proizvodnje, obrade (pročišćavanje) i iskorištenja otpadnih plinova (kotlovi za grijanje stambenih naselja itd.), skupljanja i recikliranja prašine, obrade otpadnih voda, zvučne izolacije proizvodnih hala itd.^{26–28} Već u financijskoj konstrukciji novih investicija u proizvodnju čelika planiraju se troškovi vezani uz zaštitu okoliša, koji u nekim slučajevima iznose i do 30 % ukupne investicije.

3. Povijest proizvodnje čelika

Čelik se sve do 18. st. smatrao netaljivim. Prva istraživanja izrade čelika iz kovnog željeza datiraju od 1722. godine kad je dobiven naugličeni čelik žarenjem u mješavini čađe.⁴ U Engleskoj je 1740. godine proizveden rastaljeni čelik u glinenim zatvorenim loncima uloženim u peći loženoj koksom. U okolici Sheffielda je 1862. godine proizvedeno oko 52000 t čelika u 2400 lonaca.⁴ Godine 1784. uveden je proces proizvodnje čelika pudlovanjem (franc. a *pudle*-mješavina). Na ognjište plamene peći ulagano je rastaljeno sirovo željezo zajedno s rudom željeza i miješano je željeznim šipkama. Zbog visokih sadržaja sumpora, a posebno fosfora (i do 0,3 mas. %) čelični proizvodi dobiveni postupkom pudlovanja često su bili nepouzdana. Proizvodnja čelika pudlovanjem napuštena je 1930-ih.

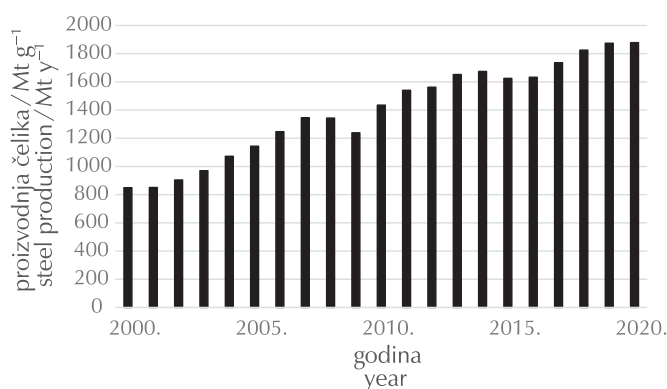
Modernija proizvodnja čelika počinje u Bessemerovim (1856.) i Thomasovim konvertorima (1878./79.) te SM (Siemens-Martin) pećima (1864.). Engleski inovator H. Bessemer, koji je imao 37 patenata izravno vezanih s proizvodnjom željeza i čelika, predložio je i gotovo "krijući" uveo proizvodnju čelika upuhivanjem zraka odozdo u talinu rastaljenog sirovog željeza s povišenim sadržajem silicija (0,9 – 1,4 mas. %). Kao radna obloga žiđa konvertora upotrebljavana je kisela vatrostalna obloga. Kisik iz zraka služio je za egzotermne reakcije oksidacije primjesa (posebno silicija). Uvođenje navedenog postupka predstavljalo je najveći doprinos u razvoju procesa proizvodnje čelika (bitno skraćeno vrijeme izrade taline). Bessemerov postupak bio je primaran način proizvodnje čelika u drugoj polovici 19. st. G. S. Thomas je 1878. godine unaprijedio Bessemerov proces konvertiranjem sirova željeza s visokim udjelom fosfora (1,6 – 2,0 mas. %), a umjesto kiselog vatrostalnog materijala ozid konvertora bio je obložen bazičnim (dolomit). Dolomitna obloga omogućavala je da se tijekom oksidacijskog razdoblja stvara bazična troska koja osigurava viši stupanj odfosforavanja i znatnije odsumporavanje. Nedostatci Bessemerovih i Thomasovih postupaka bili su: potreba za točno određenim sastavom sirova željeza, nemogućnost konverzije većih količina starog željeza, niska kvaliteta čelika (visok sadržaji sumpora, fosfora, dušika itd.). Proizvodnja čelika u Bessemerovim, odnosno Thomasovim konvertorima, prestala je sredinom 1970-ih.

Proizvodnja čelika u SM pećima temeljila se na taljenju metala u otvorenom ognjištu primjenom predgrijanog zraka i goriva na temelju regeneracije. Prvotno je za žiđe peći upotrebljavana kisela vatrostalna obloga, a kasnije se prešlo na bazičnu. Kasnije su SM peći imale samo zračnu regeneratorsku komoru, dok se gorivo (mješavina koksnog i visokopećnog plina, prirodni plin ili mazut) dovodilo kroz kombinirane gorionike, a dodavao se i kisik (kroz gorionike ili koplja) za intenzifikaciju procesa. Mazut se predgrijavao (70 – 80 °C) i raspršivao komprimiranim zrakom ili predgrijanom parom. SM postupak je nudio šire granice u pogledu korištenih sirovina (staro željezo, tekuće ili kruto sirovo željezo itd.), a najbolji omjer sirovog i starog željeza bio je 50 – 70 %. Tehnološki ciklus proizvodnje čelika u SM peći sastojao se od popravka ognjišta nakon izlivanja prethodne taline, ulaganja sirovina, taljenja, rafinacije i izlivanja taline. Prijenos topline plamenom bio je primarno zračenjem (više od 90 %). Početkom 20. st. gotovo polovica svjetske proizvodnje čelika je bila SM postupkom. U

razdoblju od 1900. do 1970. godine SM postupak bio je najzastupljeniji u svijetu.²⁹ U zemljama EU SM postupak je napušten prije više od 30-ak godina. Njemačka je zadnju proizvodnju SM čelika imala 1993. godine (565 · 10³ t). U 2000. godini svjetska proizvodnja čelika SM postupkom iznosila je 4,5 %. Danas je postupak gotovo potpuno napušten zbog niske produktivnosti: dugo vrijeme izrade taline (oko 3 sata), velika potrošnja energije (oko 4 MJ t⁻¹ čelika) i vatrostalnog materijala (15 – 25 kg t⁻¹ čelika) te ekoloških razloga. U 2020. udio proizvodnje čelika SM postupkom u svijetu iznosio je samo 0,3 % (Ukrajina i Rusija).¹³

4. Današnji postupci proizvodnje čelika

Današnji primarni postupci proizvodnje čelika temelje se na proizvodnji u elektrolučnim pećima (ELP) i kisikovim konvertorima (KK).⁸ Za izradu kvalitetnijih čelika, tj. doradu čelika u loncu primjenjuju se neki od brojnih postupaka sekundarne metalurgije: lonac-peć, vakuumsko otplinjanje itd.^{30,31} Ciljevi sekundarne metalurgije su: postizanje željenog kemijskog sastava (legiranje), homogenizacija temperature i kemijskog sastava taline, odugljičenje do veoma niskih sadržaja ugljika, odsumporavanje, odosforavanje, otplinjanje, dezoksidacija, kontrola oblika uključaka itd.⁴ Nehrdajući čelici najčešće se rade u postrojenju za razugljičenje taline kisikom pod vakuumom (VOD postupak, engl. *Vacuum Oxygen Decarburization*) i u postrojenju za razugljičenje s argonom i kisikom pri atmosferskom tlaku (AOD postupak, engl. *Argon Oxygen Decarburization*). Na slici 3 prikazana je proizvodnja, a u tablici 2 prikazani su 5-godišnji trendovi proizvodnje sirovog čelika u svijetu u razdoblju od 2000. do 2020. godine. Treba napomenuti



Slika 3 – Svjetska proizvodnja čelika u razdoblju od 2000. do 2020. godine

Fig. 3 – World steel production from 2000 to 2020

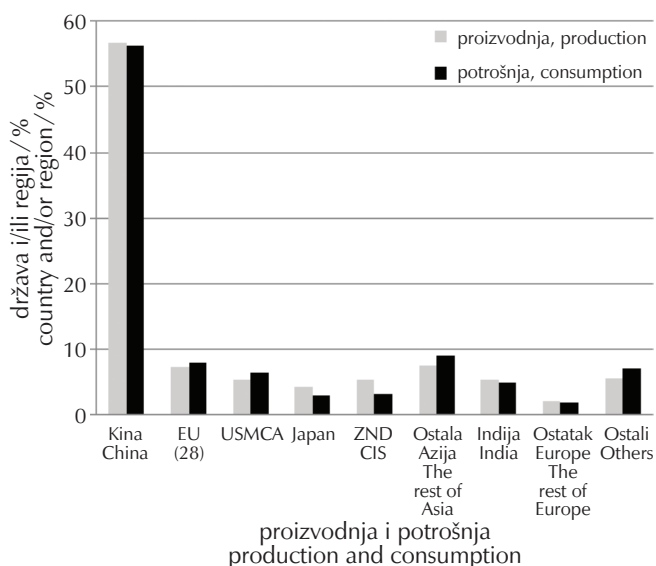
Tablica 2 – Prosječna stopa rasta proizvodnje čelika u razdoblju od 2000. do 2020. godine¹³

Table 2 – Average growth rate of steel production from 2000 to 2020¹³

Razdoblje Period	2000. – 2005.	2005. – 2010.	2010. – 2015.	2015. – 2020.
Stopa rasta / % Growth rate / %	6,2	4,6	2,5	3,0

da je u 2004. godini prvi put u svijetu proizvedeno više od milijarde tona čelika (1071 Mt). Iz slike 3 se vidi da je proizvodnja čelika kontinuirano rasla do 2007. godine, a u 2008. blago pada (1,6 %) te znatnije u 2009. godini (7,7 %) zbog svjetske globalne krize. U 2009. godini sve države u svijetu imale su pad proizvodnje čelika, osim triju koje su imale porast: Kine (13,5 %), Irana (9 %) i Indije (8,6 %).¹³ U razdoblju 2010. – 2020. rast proizvodnje čelika se nastavlja uz pad (2,9 %) i blagu stagnaciju u 2015. i 2016. zbog tržišnih poremećaja uzrokovanih nižom stopom gospodarskog rasta Kine.¹³ Ukupno gledano, prosječna godišnja brzina rasta svjetske proizvodnje čelika u razdoblju 2000. – 2020. iznosila je od 2,5 do 6,2 % (tablica 2).

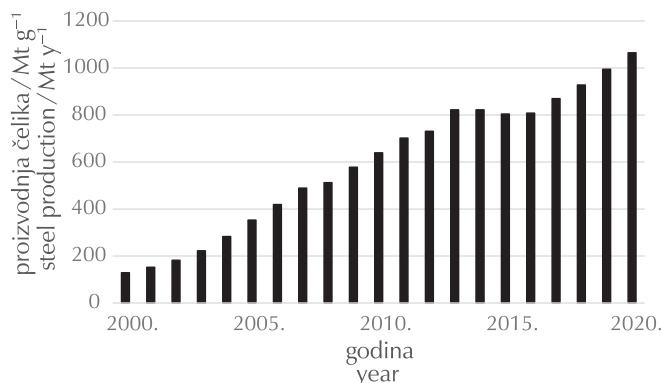
Sa stajališta proizvodnje i potrošnje čelika u regionalnom smislu u razdoblju 2000. – 2020. najveći porast imala je Azija, u kojoj je udio u svjetskoj proizvodnji čelika povećan s 39,2 % u 2000. godini na 73,9 % u 2020. godini (slika 4). Na to su najviše utjecali najveći proizvođači čelika u Aziji: Kina (56,6 %), Indija (5,3 %), Japan (4,4 %) i ostale države Azije (Južna Koreja, Tajvan itd.; 7,5 %). S druge strane, udio u svjetskoj proizvodnji čelika kontinuirano je smanjivan u državama Sjeverne Amerike i EU-a. Na primjer u EU-u je taj udio smanjen s 22,9 % u 2000. godini



Slika 4 – Udio proizvodnje i potrošnje čelika po geografskim područjima u 2020. godini. USMCA uključuje SAD, Kanadu i Meksiko, dok ZND predstavlja Zajednicu nezavisnih država

Fig. 4 – Share of steel production and consumption by geographic areas in 2020. USMCA includes USA, Canada, and MEXICO, while CIS refers to Commonwealth of Independent States

na 7,4 % u 2020. godini. Najveći svjetski proizvođač čelika (od 1996. godine) je Kina, koja je u 2000. godini imala proizvodnju od 0,127 Gt, a u 2020. 1,064 Gt, što je porast za 8,3 puta (slika 5).



Slika 5 – Proizvodnja čelika u Kini u razdoblju od 2000. do 2020. godine

Fig. 5 – Steel production in China from 2000 to 2020

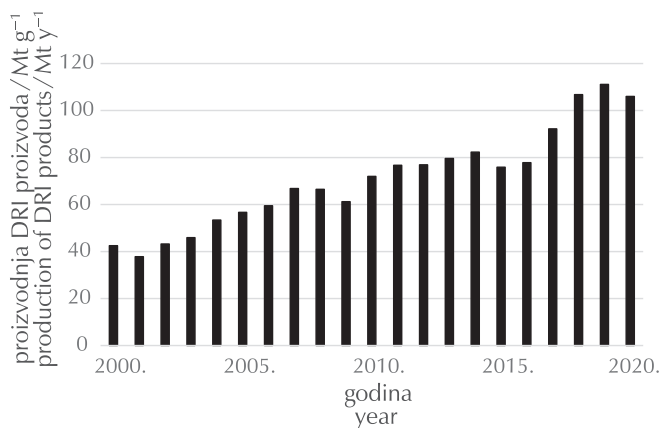
U navedenom razdoblju proizvodnja čelika u Kini kontinuirano je rasla, osim blagog pada u 2015. (2,6 %) i stagnacije u 2016. godini zbog usporenja gospodarskog rasta. Kina je u 2020. godini proizvela 56,6 % svjetske proizvodnje čelika.

Za izradu plemenitih čelika posebnih svojstava, naročito za zrakoplovnu i nuklearnu industriju, medicinu, energetske objekte itd. primjenjuju se tzv. specijalni postupci pretaljanja (pod troskom, u vakuumskim lučnim pećima, elektronskim mlazom, plazmom itd.).^{32–34} Zajedničko za te postupke je da se uložak (čelik već dobiven u KK ili ELP) sastoji od tzv. “potrošne” elektrode (lijevana, valjana ili kovana gredica) koja se ponovno progresivno pretaljuje i dodatno rafinira (rastaljene kapljice prolaze kroz trosku ili vakuum) bez kontakta s vatrostalnim materijalom. Pretaljanjem dobiveni čelici veoma su homogeni (gotovo izotropnih svojstava), imaju veoma nizak sadržaj sumpora, plinova i nemetalnih uključaka.

Proizvodnja elektročelika odvija se u elektrolučnim (primarno)²⁵ i indukcijskim pećima.^{3–5} Prva industrijska elektrolučna peć (ELP) za proizvodnju čelika puštena je u rad 1906. godine u Njemačkoj. Proizvodnju čelika u ELP-u karakterizira fleksibilnost s obzirom na izbor uloška i u njoj se mogu raditi taline za sve vrste čelika od običnih ugljičnih do visokolegiranih. Za proizvodnju čelika u ELP-u potrebna je velika snaga transformatora. U ranijem razdoblju (do 1960. godine) specifična snaga transformatora (za taljenje starog željeza) najčešće je iznosila 300 – 400 kVA/t čelika. U to su se vrijeme gotovo sve proizvodne faze (uključujući taljenje, rafinaciju itd.) odvijale u peći i proces je trajao oko 3 sata. Od 1960-ih uvode se tzv. visokoučinske (UHP, engl. *Ultra High Power*) elektrolučne peći sa snagom transformatora iznad 700 kVA/t uloška, a izrada taline skraćena je na 60 – 80 min. Najčešće se rade UHP peći za mase uloška od 70 do 250 t. Do 1970-ih godina u ELP-u su se proizvodili

uglavnom kvalitetniji, plemeniti čelici. Razvoj sekundarne metalurgije (od 1970. godine) doveo je do toga da je danas ELP uglavnom agregat za pretaljanje starog željeza, a tehnološki proces sastoji se od punjenja peći, taljenja i izlivanja taline. ELP-i mogu biti na izmjeničnu (AC peći, engl. *Alternating Current*) s tri elektrode (najčešće) i istosmjernu struju (DC peći, engl. *Direct Current*) s jednom elektrodom (od kraja 1980-ih godina). DC peći nude mogućnost za veći stupanj automatizacije (više slobodnog prostora zbog rada s jednom elektrodom), troše manje električne energije, elektroda i vatrostalnog materijala, manja je emisija buke, blaži je udar na električnu mrežu itd.

Potrebna toplina za izradu elektročelika osigurava se primarno kao posljedica izravnog električnog luka koji se uspostavlja između grafitnih elektroda i starog željeza. Električni luk osigurava kontinuirani i koncentrirani izvor topline za taljenje starog željeza. Dodatna energija osigurava se primjenom gorionika O_2 /gorivo (mješavina plinova) i oksidacijom primjesa upuhivanjem kisika. Osnovna sirovina je pripremljeno staro željezo (više od 90 %) ili čelični otpad (slika 2 i tablica 1), a mogu se upotrebljavati “vrući metal”, direktno reducirano željezo (DRI, engl. *Direct Reduced Iron*) i/ili toplo briketirano željezo HBI, engl. *Hot Briquetted Iron*).^{35–38} Dostupnost i kvaliteta starog željeza ovise o stupnju razvijenosti pojedinih država i/ili regija. Alternativni izvori željeza (“vrući metal”, DRI/HBI proizvodi) doprinose stabilnosti tržišta starog željeza, služe naugljiječnju taline i postizanju bolje kvalitete čelika, posebno sa stajališta sadržaja oligoelemenata (Cu, As, Sn itd.).³⁶ “Vrući metal” (u tekućem je stanju i sadrži 4,0 – 4,8 mas. % C) produkt je redukcijskog taljenja rude željeza uz upotrebu plina, a DRI/HBI proizvodi su proizvodi direktne redukcije (sadrže najčešće 1 – 2 mas. % C) uklanjanjem kisika iz rude željeza pomoću prirodnog plina ili ugljena. DRI/HBI proizvodi su u krutom stanju ili tzv. “spužvasto željezo” (porozno željezo) uz stupanj metalizacije 85 – 95 %. Proizvodnja izravno reduciranog željeza datira od 1969. godine i u razdoblju 2000. – 2020. pokazuje gotovo kontinuirani rast (slika 6) s iznimkom 2009. godine te stagnacije u razdoblju 2015. – 2016. Najveći svjetski proizvođači DRI proizvoda



Slika 6 – Svjetska proizvodnja izravno reduciranog željeza u razdoblju od 2000. do 2020. godine

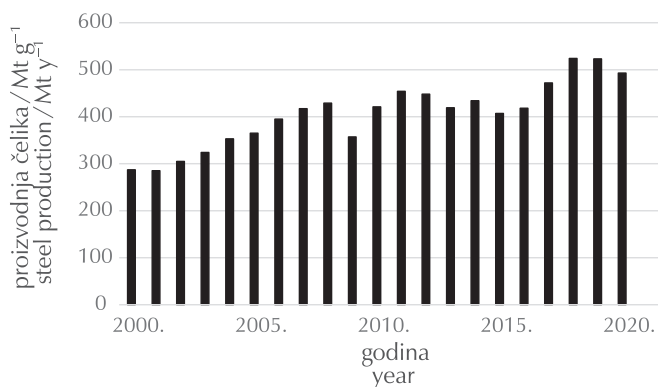
Fig. 6 – World production of direct reduced iron from 2000 to 2020

u 2020. godini bili su: Indija (33,6 Mt), Iran (30,2 Mt) i Rusija (8,5 Mt), a u EU-u su samo Njemačka (0,6 Mt) i Švedska (0,1 Mt) u 2020. godini proizvođile DRI proizvode.¹³

Nekad se elektročelik iz ELP-a primarno upotrebljavao za izradu dugih čeličnih proizvoda (žica, nosači, cijevi, itd.), a kasnije je proizvodni asortiman proširen i na plosnate proizvode (lim, trake) uglavnom iz legiranih čelika. Poseban zamah u razvoju proizvodnje čelika u ELP-u počinje kad se pojavljuju UHP peći koje se uz uporabu kisika i obradu taline u loncu po produktivnosti približavaju kisikovim konvertorima. Zahvaljujući tehnološkom razvoju, od 1965. (uvođenje kisika, sekundarna metalurgija, električni luk velike snage, rad s pjenušavom troskom, vodom hlađena kisikova koplja i gorionici O₂/prirodni plin, predgrijavanje starog željeza itd.) bitno je smanjena potrošnja energije, elektroda i vatrostalnog materijala te je skraćeno vrijeme izrade taline na manje od 40-ak minuta. Pri proizvodnji srednje i visokougljičnih elektročelika vrlo je važno dodati i nositelje ugljika (metalurški koks, antracit, grafit itd.) da bi se potakla kemijska reakcija stvaranja CO, čime se smanjuje potrošnja električne energije, a ujedno u čeliku zaostane i manja količina otopljenih plinova (vodik, dušik itd.).²⁴ Tehnologija izrade čelika u ELP-u relativno je jednostavna. Nakon ulaganja sirovina i taljenja, kontrolira se kemijski sastav i temperatura taline te, ako je sve u predviđenim granicama, slijedi izlivanje novonastale taline.²⁵ Ovisno o vrsti čelika, vrijeme od ulaganja sirovina do izlivanja taline je najčešće 40 – 60 min. Proces proizvodnje je automatiziran i vođen računalom uz *on-line* kontrolu.^{39,40} Na osnovi proizvodnje čelika u ELP-u izgrađen je u svijetu velik broj tzv. "mini-valjaonica" (0,3 – 1,5 Mt čeličnih proizvoda). Na slici 7 prikazana je svjetska proizvodnja elektročelika u dva desetljeća 21. stoljeća. Na slici 7 može se uočiti da je u tom razdoblju proizvodnja elektročelika uglavnom rasla, osim kad je 2009. godine zamijećen pad proizvodnje zbog globalne svjetske krize. Taj je postupak znatnije zastupljen u industrijski razvijenim državama jer imaju znatno veće količine starog željeza za pretalijavanje. Udio svjetske proizvodnje čelika u ELP-u u 2020. je 26,3 %, a udio elektročelika u EU-u je viši (42,4 %). Sjeverna Amerika je regija s najvećim udjelom u proizvodnji elektročelika u svijetu (69,9 % u 2020. godini).¹³

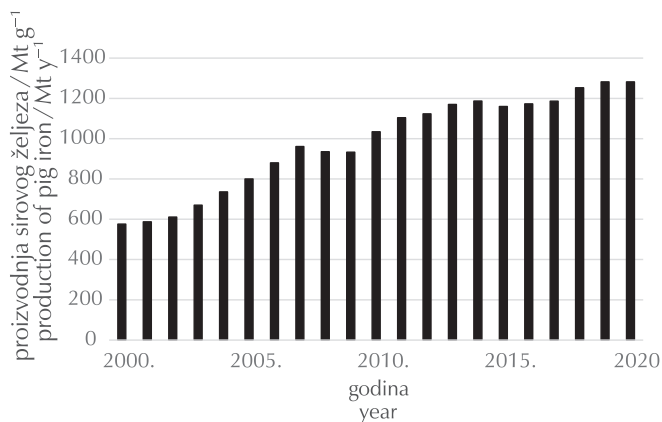
U austrijskim mjestima Linzu i Donawitzu 1949. godine započeli su eksperimenti izrade čelika primjenom tehnički čistog kisika (upuhivanjem odozgo) za pročišćavanje talina bijelog sirovog željeza na adaptiranim Bessemerovim konvertorima. Navedeno je dovelo do toga da su u Linzu 1952. (dva konvertora kapaciteta po 30 t), a u Donawitzu 1953. (dva konvertora kapaciteta po 36 t) u industrijsku primjenu uvedeni tzv. LD (Linz-Donawitz) kisikovi konvertori.^{2,41} Današnji kapacitet KK-a najčešće je 50 – 400 t. Proizvodnja čelika u KK-u započinje ulaganjem kroz grlo konvertora sirovina (pripremljeni čelični otpad, tekuće sirovo željezo, talitelji, oksidansi itd.). Primarna sirovina (75 – 90 %) za proizvodnju čelika u KK-u je sirovo željezo (širokog raspona sastava i kvalitete). Bijelo sirovo željezo dobiva se redukcijom pripremljene rude željeza pomoću koksa u visokoj peći. Svjetska proizvodnja sirovog željeza ima konstantan rast (osim 2009. godine), a u razdoblju od 2000. do 2020. povećana je za oko 55 % (slika 8). Najveći svjetski proizvođači sirovog željeza su: Kina (887,5 Mt), Indija (67,8 Mt), Japan (61,6 Mt), Rusija (33,6 Mt) i Južna

Koreja (45,4 Mt). U državama EU-a se 2020. godine proizvelo (77 Mt) sirovog željeza, od čega najviše u Njemačkoj (22,5 Mt) i Francuskoj (7,7 Mt).¹³



Slika 7 – Svjetska proizvodnja čelika elektro-lučnim postupkom u razdoblju od 2000. do 2020. godine

Fig. 7 – World steel production by electric arc process from 2000 to 2020



Slika 8 – Svjetska proizvodnja sirovog željeza u razdoblju od 2000. do 2020. godine

Fig. 8 – World production of pig iron from 2000 to 2020

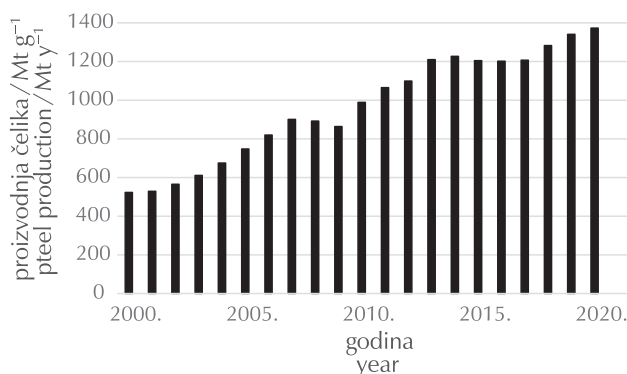
Pored tekućeg sirovog željeza i nešto starog željeza u KK se dodaju talitelji i oksidansi s ciljem stvaranja reaktivne i fluidne troske koja je sposobna vezati i asimilirati neželjene primjese. Najvažniji talitelji su vapno (pečeno ili u obliku vapnenca), Ca-fluorit, boksit, dolomit itd. Dodatkom talitelja počinje i reakcija između novonastalih oksida mangana, željeza, fosfora, čime dolazi do stvaranja troske koja "pliva" na površini čelika kad se završi upuhivanje kisika.^{42,43} Upuhivanje kisika provodi se pomoću vodom hlađenog koplja koje se u KK najčešće uvodi odozgo. Položaj koplja (uvjetovan radom čeličane) osigurava pravilno odvijanje procesa. Upuhivanjem kisika u talinu (traje do 20 min) omogućuje se oksidacija ugljika, silicija i mangana te odosforavanje i donekle odsumporavanje putem plinske faze (5 – 10 %). Zadnja faza prije izlivanja taline čelika je kontrola kemijskog sastava i temperature. Ako se analizom potvrdi da novonastala talina čelika zadovoljava sve

tražene uvjete, konvertor se nagnje te se čelik izljuje kroz otvor za ispušt taline. Ovisno o masi taline i načinu lijevanja temperatura taline pri ispuštu treba biti 80 – 150 °C iznad likvidus temperature. Pri tome treba paziti da se u lonac s čelikom ne izlije i troska. Troska se također izljuje u lonac za trosku, kroz grlo konvertora.

Postupak proizvodnje čelika u KK-u prihvaćen je u cijelom svijetu jer je fleksibilniji s obzirom na sirovine i vrijeme izrade taline je kraće (30 – 40 min). U konvertorima se primarno proizvode ugljični (sve vrste) i masovni čelici iako se mogu proizvoditi i neki legirani čelici.³ Za proizvodnju čelika u konvertoru nije potreban dodatni izvor topline. Energija za proces osigurava se iz rastaljenog sirovog željeza, egzotermnih reakcija oksidacije primjesa kisikom koji se u upuhuje odozgo (primarno), odozdo ili kombinirano. Kontrola i vođenje procesa je automatizirano i računalno praćeno pomoću statičkih i dinamičkih modela.^{44,45} Od 1970. godine KK je primarni agregat za proizvodnju čelika u svijetu (oko 40 % ukupne svjetske proizvodnje čelika). Na slici 9 prikazana je svjetska proizvodnja čelika u KK-u u razdoblju od 2000. do 2020. godine. Kao što se vidi na slici 9, proizvodnja čelika u konvertoru raste do 2009. godine kad nastupa svjetska globalna kriza. Nakon toga ponovno slijedi rast uz blagu stagnaciju u razdoblju 2015. – 2017. Udio svjetske proizvodnje čelika u KK-u u 2020. je 73,2 %, a u EU-u 57,6 %.¹³

Prvih deset država po proizvodnji čelika u svijetu i pet najvažnijih tvrtki u 2000. i 2020. godini navedene su u tablicama 3 i 4. Iz tablice 3 vidi se da proizvodnjom čelika, kao regija, dominira Azija, najveći porast proizvodnje ostvarili su Kina, Indija i Turska, a najveći pad SAD, Njemačka i

Japan. Najveći proizvođači čelika u 2020. godini u EU-u bili su: Njemačka (35,7 Mt), Italija (20,4 Mt) i Francuska (11,6 Mt).¹³ Glavne svjetske tvrtke za proizvodnju čelika su u Kini (tablica 4), a od 2020. godine najveći proizvođač čelika je tvrtka *China Baowu Group* s proizvodnjom od 115,3 Mt (6,1 % svjetske proizvodnje čelika).



Slika 9 – Svjetska proizvodnja čelika konvertorskim postupkom u razdoblju od 2000. do 2020. godine

Fig. 9 – World steel production by converter process from 2000 to 2020

Tvrtke za proizvodnju čelika često su dio cjelokupnog kružnog ciklusa industrije čelika, tj. od rudarstva, proizvodnje čelika, recikliranja itd.⁴⁶ Među najvećih 50 tvrtki za proizvodnju čelika u svijetu s godišnjom proizvodnjom iznad

Tablica 3 – Deset država najvećih svjetskih proizvođača čelika u 2000. i 2020. godini; vrijednosti su izražene u Mt¹³

Table 3 – Top ten steel production countries in 2000 and 2020; the values are expressed in Mt¹³

Država Country	2000. Mt	Država Country	2020. Mt	Promjena s obzirom na 2000./% Change related to year 2000/%
Kina (China)	127,2	Kina (China)	1064,8	+837,1
Japan	106,4	Indija (India)	100,3	+372,8
SAD (USA)	101,5	Japan	83,2	-21,8
Rusija (Russia)	59,1	SAD (USA)	72,7	-28,3
Južna Koreja (South Korea)	43,1	Rusija (Russia)	71,6	+21,1
Njemačka (Germany)	46,4	Južna Koreja (South Korea)	67,1	+55,7
Ukrajina (Ukraine)	31,4	Turska (Turkey)	35,8	+250,3
Brazil	27,9	Njemačka (Germany)	35,7	-23,0
Indija (India)	26,9	Brazil	31,0	+11,1
Italija (Italy)	26,7	Iran	29,0	+439,4

Tablica 4 – Pet najvećih svjetskih tvrtki za proizvodnju čelika u 2000. i 2020. godini; vrijednosti su izražene u Mt¹³

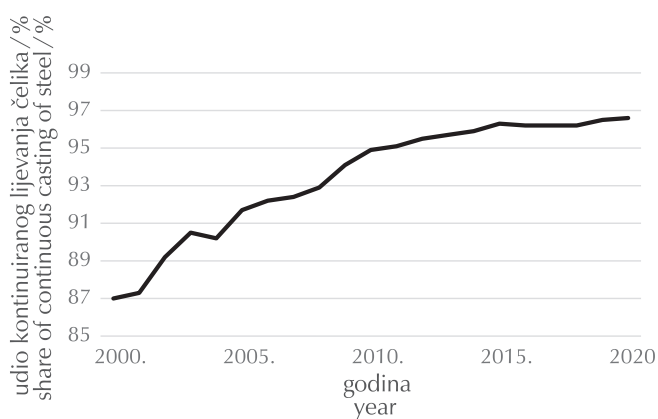
Table 4 – Top five largest steelmaking companies in 2000 and 2020; the values are expressed in Mt¹³

Tvrtka (država) Company (Country)	2000. Mt	Tvrtka (država) Company (Country)	2020. Mt
Nippon Steel (Japan)	28,4	China Baowu Group (Kina)	115,29
POSCO (J. Koreja)	27,7	Arcelor Mittal (Luksemburg)	78,46
Arbed (Luksemburg)	24,1	HBIS Group (Kina)	43,76
LNM (V. Britanija)	22,4	Shangang Group (Kina)	41,59
Usinor (Francuska)	21,0	Nippon Steel Corporation (Japan)	41,58

8 Mt čak je 29 kineskih tvrtki (58 %). Tako velik porast proizvodnje čelika u Kini posljedica je i velikih ulaganja u sustavni znanstveno-istraživački rad u industriju čelika koji se provodi na tri umrežene institucionalne razine.^{47,48} Prva razina obuhvaća aktivnosti neovisnih instituta kao što je nacionalni istraživački Institut za željezo i čelik (engl. *China Iron&Steel Research Institute Group*, CISRI). Druga razina su sveučilišta koja nisu usmjerena samo na edukaciju studenata i cjeloživotno obrazovanje inženjera nego i na servisiranje industrije čelika kroz realne projekte proizašle iz tog sektora. Na primjer, kod brojnih sveučilišta između trećine i polovine fakulteta uključeno je u sektor razvoja proizvodnje i primjene čelika. Treća razina obuhvaća tehničke istraživačke institute ili tehničke centre koje imaju sve najveće i/ili srednje tvrtke za proizvodnju čelika, a primarno su usmjereni na istraživačko-razvojne aktivnosti vlastitih tvrtki. Kineske tvrtke za proizvodnju čelika ulažu godišnje oko 1,2 % prihoda u istraživanje i razvoj, pri čemu dio odlazi za nacionalni institut i sveučilišta, a najveći dio za projekte instituta ili centara vlastitih tvrtki. Financijsku potporu za industriju čelika osigurava i od vlada na nacionalnoj razini i industrijske tvrtke koje se bave čelikom. Zanimljivo je da nacionalna akademija znanosti Kine ima dva instituta koji se bave s fundamentalnim istraživanjima tehnologije čelika: Istraživački institut procesnog inženjerstva bavi se heterogenim reakcijama, resursima i kemijom ekoloških materijala, a Institut za istraživanje metala usmjeren je na razvoj novih čelika, njihovu učinkovitost i koroziju metala.

5. Lijevanje čelika

Lijevanje čelika je završna metalurška faza pri proizvodnji čelika.^{8,49} Talina čelika proizvedena u primarnom agregatu (KK ili ELP)⁵⁰ izliva se u livni lonac nakon čega se može doraditi nekim od postupaka sekundarne metalurgije.^{30,31} Nakon toga čelik se lijeva klasično (rjeđe) ili kontinuirano. Cilj klasičnog lijevanja (lijevanje u ingote) je dobivanje geometrijski jednostavnih oblika (kvadratni, pravokutni, okrugli, poligonalni itd.) u trajnim uspravnim kalupima ili kokilama. Klasično lijevanje od 1970-ih gubi na svojem značenju i opsegu te se primarno zadržalo za dobivanje ingota velike mase, npr. ingota namijenjenih za kovanje, kao i kod izrade nekih visokoleganih čelika. Kontinuirano lijevanje može se pojednostavljeno definirati kao konvertiranje volumena tekućeg čelika u kontinuiranu "žilu", tj. skrutnutu gredicu, blum, slab itd. Postupak je utemeljen na jednoličnom kretanju lijevane taline čelika u odnosu na zone lijevanja i skrućivanja. Od 1970. godine udio kontinuiranog lijevanja (9,5 %) konstantno raste. Većina današnjih postupaka kontinuiranog lijevanja su radialnog i zakrivljenog tipa. Pri tome se tzv. "žila" savija tijekom skrućivanja i izravna dok još nije potpuno skrutnuta. U razdoblju od 2000. do 2020. godine udio kontinuiranog lijevanja čelika u svijetu povećan je za oko 10 %: s 87 na 96,6 % (slika 10). Udio kontinuiranog lijevanja u 2020. godini u Sjevernoj Americi je 97,4 %, u državama EU-a 96,8 %, a niži udjeli kontinuiranog lijevanja čelika još su samo u Indiji (87 %), Rusiji (82,5 %) i Ukrajini (66,2 %).



Slika 10 – Udio kontinuiranog lijevanja čelika u razdoblju od 2000. do 2020. godine

Fig. 10 – Share of continuous casting of steel from 2000 to 2020

6. Zaključak

U prva dva desetljeća 21. st. uz porast, a i blagi pad u 2008. – 2009., došlo je i do znatnijeg regionalnog prestrukturiranja proizvodnje čelika. U 2000. godini proizvedeno je 847,2 Mt, a u 2020. godini proizvedeno je 1,877 Gt čelika (porast od 2,2 puta). Obim proizvodnje čelika u apsolutnom iznosu u visokorazvijenim državama stagnira, ali se u nekim čak i smanjuje (SAD, Japan, Njemačka itd.). U svijetu je u razdoblju 2000. – 2020. ukupno proizvedeno 29,4 Gt sirovog čelika. Razvijene zemlje orijentiraju se na proizvodni asortiman s višim kvalitetnim zahtjevima, dok "relativno novi" proizvođači rade uglavnom masovne čelike. Čelik se kao univerzalni materijal najviše upotrebljavao u 2019. godini u području konstrukcija (52 %), strojne opreme (16 %) i automobilske industrije (12 %).

Konvertorski (73,2 % u 2020.) i elektrolučni postupak (26,3 % u 2020.) i nadalje dominiraju i ne predstavljaju jedan drugom konkurenciju. Dapače, oni se nadopunjavaju jer se u kisikovim konvertorima upotrebljava kao primarna sirovina sirovo željezo, a ostatak staro željezo, dok je kod elektrolučnih peći obrnuto. Elektročelik je jeftiniji i ekološki prihvatljiviji (niža emisija CO₂). Sirovo željezo je i nadalje osnovna sirovina za proizvodnju čelika koje je u 2020. s proizvodnjom od 1,319 Gt sudjelovalo sa 70 % u proizvodnji čelika, a preostali udio su staro željezo (463 Mt) i izravno reducirano željezo (106 Mt). Stupanj recikliranja čelika u razdoblju 2011. – 2019. iznosio je 34 – 37 %. U 2020. godini reciklirano je 24,6 % čelika (utrošeno je 463 Mt starog željeza) zbog tržišnih poremećaja uslijed globalne pandemije uzrokovane virusom Covid-19. Primat proizvodnje čelika je u državama i tvrtkama iz Azije (73,9 % svjetske proizvodnje). Najveći svjetski proizvođač čelika i nadalje je Kina, koja je proizvodnju čelika povećala u 2020. godini za 8,3 puta (56,6 % svjetske proizvodnje) u odnosu na proizvodnju u 2000. godini. To je i posljedica sustavnog pristupa industriji čelika s državne razine te velikih ulaganja u znanstveno-istraživački rad od strane tvrtki (oko 1,2 % ostvarenog prihoda) koje se bave proizvodnjom čelika. U razdoblju 2000. – 2020. udio kontinuiranog lijevanja čelika je povećan za oko 10 %, s 87 na 96,6 %.

Literatura References

1. J. Črnko, Kratki prikaz razvoja postupaka proizvodnje željeza, *Metalurgija* **32** (3) (1993) 117–122.
2. P. Pavlović, Materijal čelik, SKTH/Kemija u industriji, Zagreb, 1990., str. 5–32.
3. Z. Pašalić, *Metalurgija čelika*, Fakultet za metalurgiju i materijale Zenica, Univerzitet u Sarajevu, Zenica, 2002., str. 3–205.
4. M. Gojić, *Metalurgija čelika*, Denona, Zagreb, 2005., str. 1–441.
5. Steel Manual, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2002., str. 2–175.
6. M. Tolar, Elektrojeklarstvo, SIJ-ACRONI d. o. o., Jesenice, 2006., str. 9–263.
7. Latest developments in steelmaking capacity, Report of Directorate for Science, Technology and Innovation, Organisation for Economic Co-operation and Development, DSTI/SC(2020)3/FINAL, 22. 6. 2020.
8. L. Holappa, Recent achievements in iron and steel technology, *J. Chem. Technol. Metall.* **52** (2) (2017) 159–167.
9. URL: <https://www.lightmetallage.com/news/industry-news/smelting/iai-releases-2020-total-global-primary-aluminum-and-alumina-production-data/> (3. 3. 2022.).
10. M. Gojić, Current state and development of steelmaking processes, *Metalurgija* **43** (3) (2004) 163–168.
11. E. Karakaya, C. Nuur, L. Assbring, Potential transitions in the iron and steel industry in Sweden: Towards a hydrogen-based future?, *J. Clean. Prod.* **195** (2018) 651–663, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.142>.
12. M. D. Fenton, Steel in the 20th Century, U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, 2000., str. 40.1–40.4.
13. URL: <https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook/> (31. 1. 2021.).
14. W. Frenz, Industry 4.0 in Metallurgy, *World of Metallurgy-ERZMETALL* **72** (4) (2019) 228–232.
15. Z. Li, J. Li, S. Spooner, S. Seetharaman, Basic Oxygen Steelmaking Slag: Formation, Reaction, and Energy and Material Recovery, *Steel Res. Int.* **93** (2022) 2100167, doi: <https://doi.org/10.1002/srin.202100167>.
16. A. Abdelrahim, M. Aula, M. Iljana, T. Willms, T. Echterhof, S. Steinlechner, D. Mombelli, C. Mapelli, M. Omran, S. Preiss, T. Fabritius, Suitability of Self-Reducing and Slag-Forming Briquettes for Electric Arc Furnace Use Based on Laboratory Tests, *Steel Res. Int.* **93** (2022) 2100472, doi: <https://doi.org/10.1002/srin.202100472>.
17. D. Sichen, J. Huss, A. Vickerfält, M. Berg, J. Martinsson, C. Allertz, N. Kojola, The Laboratory Study of Metallurgical Slags and the Reality, *Steel Res. Int.* **93** (2022) 2100132, doi: <https://doi.org/10.1002/srin.202100132>.
18. M. A. Reuter, F. Kaufen, S. Geimer, N. Borowski, R. Degel, T. Lux, Metallurgical Slags Enable the Circular Economy-Digital Twins of Metallurgical Systems, *World Metall. –ERZMETALL* **74** (4) (2021) 192–202.
19. E. K. Anastasiou, A. Liapisa, M. Papachristoforou, Life Cycle Assessment of Concrete Products for Special Applications Containing EAF Slag, *Procedia Environ. Sci.* **38** (2017) 469–476, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.138>.
20. A. A. Cikmit, T. Tsuchida, K. Takeyama, R. Hashimoto, T. Noguchi, K. Kaya, Effects of primary curing and subsequent disturbances on strength development of steel slag-treated marine clay, *Soils Found.* **61** (2021) 1287–1301, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.07.005>.
21. A. M. Rashad, A synopsis manual about recycling steel slag as a cementitious material, *J. Mater. Res. Technol.* **8** (5) (2019) 4940–4955, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.038>.
22. A. Goli, The study of the feasibility of using recycled steel slag aggregate in hot mix asphalt, *Case Studies in Construction Materials* **16** (2022) e00861, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00861>.
23. N. L. Ferber, K. M. Al Naimi, J. Hoffmann, K. Al-Ali, N. Calvet, Development of an electric arc furnace steel slag-based ceramic material for high temperature thermal energy storage applications, *J. Energy Storage* **51** (2022) 104408, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104408>.
24. M. Gojić, Enciklopedijska natuknica: čelik, Hrvatska tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2022., URL: <https://tehnika.lzmk.hr/?s=%C4%8Delik>.
25. D. Knežević, Pregled svjetske proizvodnje čelika u razdoblju od 2000. do 2019. godine-završni rad, *Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Sisak*, 2021., str. 12–38.
26. I. Matinoa, V. Collaa, S. Baragiolab, Electric energy consumption and environmental impact in unconventional EAF steelmaking scenarios, *Energy Procedia* **105** (2017) 3636–3641, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.839>.
27. S. Ghasemi, G. Costa, D. Zingaretti, M. U. Bähler, R. Baciocchia, Comparative life-cycle assessment of slurry and wet accelerated carbonation of BOF slag, *Energy Procedia* **114** (2017) 5393–5403, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1675>.
28. A. Toktarova, V. Walter, L. Göransson, F. Johnsson, Interaction between electrified steel production and the north European electricity system, *Appl. Energy* **310** (2022) 118584, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118584>.
29. M. Gojić, J. Črnko, S. Kožuh, Proizvodnja čelika u dvadesetom stoljeću, *Kem. Ind.* **51** (7-8) (2002) 317–328.
30. H. Yu, G. Qiu, J. Zhang, X. Wang, Effect of Medium Basicity Refining Slag on the Cleanliness of Al-killed Steel, *ISIJ Int.* **61** (12) (2021) 2882–2888, doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-184>.
31. M. Jiang, K. Li, R. Wang, E. Yang, X. Wang, Cleanliness and Control of Inclusions in Al-Deoxidized Bearing Steel Refined by Basic Slags during LF-VD-Ar Bubbling, *ISIJ Int.* **62** (1) (2022) 124–132, doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-306>.
32. J. Campbell, Melting, Remelting, and Casting for Clean Steel, *Steel Research Int.* **88** (1) (2017) 1600093, doi: <https://doi.org/10.1002/srin.201600093>.
33. A. Pribulová, P. Futáš, A. Kmita, D. Márasová, M. Holtzer, Impact of Electro Slag Remelting on 14109 Steel Properties, *Arch. Metall. Mater.* **62** (1) (2017) 181–185, doi: <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0025>.
34. G. Qiu, D. Zhan, C. Li, Y. Yang, Z. Jiang, H. Zhang, Effects of electroslag remelting process and Y on the inclusions and mechanical properties of the CLAM steel, *Nucl. Eng. Technol.* **52** (2020) 811–818, doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.10.001>.
35. J. Krajcar, Proizvodnja čelika u elektrolučnoj peći-stanje i perspektive, *Metalurgija* **35** (2) (1996) 99–102.
36. M. Gojić, S. Kožuh, Development of Direct Reduction Processes and Smelting Reduction Processes for the Steel Production, *Kem. Ind.* **55** (1) (2006) 1–10.
37. R. Béchara, H. Hamadeh, O. Mirgaux, F. Patisson, Investigation into the Hot Briquetting of Fine-Grained Residual Materials from Iron and Steel Production, *Materials* **11** (2018) 1094, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11071094>.
38. M. Kirschen, T. Hay, T. Echterhof, Process Improvements for

- Direct Reduced Iron Melting in the Electric Arc Furnace with Emphasis on Slag Operation, *Processes* **9** (2021) 402, doi: <https://doi.org/10.3390/pr9020402>.
39. A. Tomasović Teklić, B. Filipović-Grčić, I. Pavić, Modelling of three-phase electric arc furnace for estimation of voltage-flicker in power transmission network, *Electr. Power Syst. Res.* **146** (2017) 218–227, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2017.01.037>.
 40. M. M. Elkoumy, M. El-Anwar, A. M. Fathy, G. M. Megahed, I. El-Mahallawi, H. Ahmed, Simulation of EAF refining stage, *Ain Shams Eng. J.* **9** (2018) 2781–2793, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.10.002>.
 41. Z. Li, J. Li, S. Spooner, S. Seetharaman, Basic Oxygen Steel-making Slag: Formation, Reaction, and Energy and Material Recovery, *Steel Research Int.* **93** (2022) 2100167, doi: <https://doi.org/10.1002/srin.202100167>.
 42. L. M. Vieira, H. C. Clem de Oliveira, V. B. Telles, E. J. E. A. Vieira, J. Roberto de Oliveira, Influence of lime particle and slag properties on lime dissolution in BOF converter, *J. Mater. Res. Technol.* **9** (6) (2020) 14878–14886, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.058>.
 43. R. P. De Menezes, P. F. Salarolli, L. G. Batista, H. S. Furtado, M. A. S. L. Cuadros, Slopping index for LD converters based on sound and image data fusion by fuzzy Kalman filter, *Ironmak. Steelmak.* **49** (2) (2022) 178–188, doi: <https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1973883>.
 44. D. Dering, C. Swartz, N. Dogan, Dynamic Modeling and Simulation of Basic Oxygen Furnace (BOF) Operation, *Processes* **8** (2020) 483, doi: <https://doi.org/10.3390/pr8040483>.
 45. Z. Wang, Q. Liu, H. Liu, S. Wei, A review of end-point carbon prediction for BOF steelmaking process, *High Temp. Mater. Process.* **39** (2020) 653–662, doi: <https://doi.org/10.1515/htmp-2020-0098>.
 46. M. A. Reuter, A van Schaik, Sustainable steel, *Stahl und Eisen* **127** (4) (2007) 87–93.
 47. Z. Zhong, Steel Research Institutions in China, *Steel Res. Int.* **81** (9) (2010) 701–705, doi: <https://doi.org/10.1002/srin.201090147>.
 48. Y. Liu, H. Li, H. An, R. S. X. Liu, S. Ulgiati, Environmental and economic sustainability of key sectors in China's steel industry chain: An application of the Emergy Accounting approach, *Ecol. Indic.* **129** (2021) 108011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108011>.
 49. L. Yu, W. Jiang, S. Gu, P. Tang, Z. Wang, G. Wen, Investigation in CaO–SiO₂–CaF₂–C slags during the sintering and melting process, *Ironmak. Steelmak.* **49** (2) (2022) 199–207, doi: <https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1976038>.
 50. X. Lia, W. Sun, L. Zhao, J. Caib, Material Metabolism and Environmental Emissions of BF-BOF and EAF Steel Production Routes, *Miner. Process. Extr. Metall.* **39** (1) (2018) 50–58, doi: <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1324440>.

SUMMARY

World Steel Production from 2000 to 2020

Mirko Gojić,* Ivana Ivanić, and Dijana Knežević

This paper shows the trend of the world crude steel production in the first two decades of the 21st century. From 2000 to 2020, the world steelmaking continuously increased (total production of 28.5 billion t steel), but decreased in 2008 (1,6 %) and 2009 (7,7 %) because of the global financial and economic crises. For more than fifty years, the primary steelmaking processes are those by means of two technologies: oxidation of pig iron (product from blast furnace) in basic oxygen converters by means of technical oxygen, and smelting of old ferrous (steel scrap) in the electro arc furnaces. For the production of quality steel, the secondary metallurgy procedures (treatment of steel in ladle) play a greater role. In 2000, global steel production was 847.2 million t (basic oxygen converters share was 58.2 % and the electro arc furnaces 33.8 %), while in 2020, production reached 1.8775 billion t steel, which is an increase of 2.2 times. By 2020, the production of steel by steelmaking processes was 73.2 % by basic oxygen converters, 26.3 % by electro arc furnaces, 0.3 % by Siemens-Martin furnaces, and 0.2 % by other procedures of steel production. Primacy in steelmaking is in countries and companies from Asia (73.9 % of the world's output). The recycling degree of steel in the period from 2011 to 2019 was 34–37 %. China is the largest world steel-making country (since 1996). China had an increase in steelmaking of 8.3 times in the period from 2000 to 2020 (from 127.2 Mt up to 1.064 Gt). China produced 56.6 % of the world's steel. From 2000 to 2020, a share of continuous casting was increased by about 10 % (from 87 to 96.6 %).

Keywords

Steel, basic oxygen converter, electro arc furnace, pig iron, steel scrap, continuous casting

University of Zagreb, Faculty of Metallurgy
Sisak, Aleja narodnih heroja 3, 44 000 Sisak,
Croatia

Review
Received February 11, 2022
Accepted April 8, 2022