

Čelični otpad kao sekundarna sirovina za proizvodnju čelika

Rajković, Marija

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:396466>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-03**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Marija Rajković

ZAVRŠNI RAD

Sisak, srpanj 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Marija Rajković

ČELIČNI OTPAD KAO SEKUNDARNA
SIROVINA ZA PROIZVODNJU ČELIKA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: prof. dr. sc. Stjepan Kožuh

Članovi povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

Predsjednik: prof. dr. sc. Mirko Gojić
Član: prof. dr. sc. Stjepan Kožuh
Član: prof. dr. sc. Zoran Glavaš
Zamjenski član: doc. dr. sc. Ivana Ivanić

Sisak, srpanj 2020.

IME: Marija
PREZIME: Rajković
MATIČNI
BROJ: BE- 3610/16

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem
sljedeću

IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj završni rad pod naslovom:

ČELIČNI OTPAD KAO SEKUNDARNA SIROVINA ZA PROIZVODNJU ČELIKA

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima
osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, 20.7.2020.

(vlastoručni potpis)

*Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i
na ženski i na muški rod.*

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Stjepanu Kožuhu na uloženom trudu i vremenu, savjetima, pomoći i strpljenju pri izradi završnog rada. Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj podršci i strpljenju tijekom mog života i studija.

SAŽETAK

ČELIČNI OTPAD KAO SEKUNDARNA SIROVINA ZA PROIZVODNJU ČELIKA

Čelik je materijal koji se najviše koristi od svih metala i to u svim granama industrije (npr. metaloprerađiva, transport, poljoprivreda, rudarstvo itd.) zbog svojih dobrih svojstava kao što su čvrstoća, žilavost, rastezljivost i sl. Proizvodnja čelika se može podijeliti na dva osnovna načina: proizvodnja u integralnim željezarama i pretaljiivanje čeličnog otpada. Suvremena proizvodnja čelika sastoji se od tri vrste metalnog uložka koji može biti u obliku sirovog željeza, čeličnog otpada i direktno reduciranog željeza. U grupu primarnih sirovina za proizvodnju čelika ubrajaju se sirovo željezo i produkti direktne redukcije, dok čelični otpad predstavlja sekundarnu sirovinu. Cilj ovog rada bio je ukazati na važnost primjene čeličnog otpada kao sekundarne sirovine te koliko se takvim načinom proizvodnje čelika pridonosi uštedi energije odnosno zaštiti okoliša. Pregledom dostupne literature, dan je poseban osvrt na kvalitetu i klasifikaciju čeličnog otpada, pripremu čeličnog otpada za proizvodnju čelika kao i osnovni postupci proizvodnje čelika koji kao sekundarnu sirovinu koriste čelični otpad.

Ključne riječi: čelik, sirovine za proizvodnju čelika, čelični otpad, kisikov konvertor, elektrolučna peć

ABSTRACT

STEEL SCRAP AS A SECONDARY RAW MATERIAL FOR STEEL PRODUCTION

Steel is the material which from all metals in all branches of industry is mostly used (eg. metal processing, transport, agriculture, mining, etc.) due to its good properties such as strength, toughness, elongation, etc. Steel production can be divided into two basic processes: production in integral steelworks and remelting of steel scrap. Modern steel production consists of three types of metal charge which can be in the form of pig iron, steel scrap and directly reduced iron. The group of primary raw materials for steel production includes pig iron and direct reduction products, while steel scrap is a secondary raw material. The aim of this paper was to point out the importance of steel scrap use as a secondary raw material and the extent to which such a method of steel production contributes to energy savings and environmental protection. By the review of available literature, a specific overview was given to the quality and classification of steel scrap, the preparation of steel scrap for steel production as well as the basic processes of steel production that use steel scrap as a secondary raw material.

Keywords: steel, raw materials for steel production, steel scrap, oxygen converter, electric arc furnace

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O ČELIKU.....	2
2.1. Definicija čelika.....	2
2.2. Povijesni pregled izrade čelika.....	3
2.3. Moderni postupci proizvodnje čelika.....	5
3. PROIZVODNJA ČELIKA.....	7
3.1. Pregled proizvodnje čelika u svijetu.....	7
3.2. Čelik i čelični otpad u budućnosti.....	11
3.3. Podjela i označivanje čelika.....	12
4. SIROVINE ZA PROIZVODNJU ČELIKA.....	13
4.1. Primarne sirovine.....	14
4.2. Čelični otpad.....	14
4.2.1. Kvaliteta čeličnog otpada.....	16
4.2.2. Priprema čeličnog otpada.....	19
4.2.3. Procjena nastajanja čeličnog otpada.....	20
4.3. Ostale sirovine.....	22
5. PRIMJENA ČELIČNOG OTPADA.....	23
5.1. Proces proizvodnje čelika u kisikovom konvertoru.....	24
5.2. Proces proizvodnje čelika u elektrolučnim pećima.....	26
5.3. Novi postupci.....	27
5.4. “Zeleni” materijal čelik.....	30
5.5. Prašina i emisije tijekom procesa recikliranja čelika.....	31
6. ZAKLJUČAK.....	33
7. LITERATURA.....	34
ŽIVOTOPIS.....	36

1. UVOD

Čelik, a samim time i legure na bazi željeza, imaju izrazito veliku važnost za svako nacionalno gospodarstvo. Svaka gospodarska grana rabi Fe-legure. Napredak u glavnim industrijskim granama (npr. metaloprerađiva, transport, poljoprivreda, rudarstvo itd.) nije moguć bez čelika, jer je gospodarska snaga svake države određena proizvodnjom čelika. Proizvodnja čelika je mjerilo industrijskog razvoja države, a iskazuje se potrošnjom čelika "po glavi stanovnika". Troska koja preostane nakon proizvodnje čelika može se koristiti u drugim industrijama [1].

U industriji proizvodnje čelika zaposlen je veliki broj djelatnika, te to znatno pridonosi ukupnom bruto društvenom proizvodu države. U prošlosti je proizvodnja željeza i čelika bila sinonim za gospodarsku i političku moć države. Ni danas situacija nije bitno drukčija.

Udio Fe-legura i dalje prevladava u svjetskoj proizvodnji i to na razini od 95 % ukupne proizvodnje svih metalnih materijala. Od svih danas korištenih materijala čelik je po proizvodnji i potrošnji treći materijal, ispred njega su proizvodi od drveta i cementa.

Čelik možemo podijeliti na više način: prema načinu proizvodnje, prema kemijskom sastavu, prema mikrostrukтури, prema kvaliteti i prema namjeni. Prema načinu proizvodnje i s obzirom na primarni proizvodni agregat čelik dijelimo na konvertorski, elektročelik i Siemens-Martinov čelik (vrlo male količine), a s obzirom na naknadnu obradbu na vakuumski otplinjeni čelik, čelik tretiran sintetičkom troskom i čelik proizveden upuhivanjem inertnoga plina. Po kemijskom sastavu čelik dijelimo na čelik zajamčenog ili nezajamčenog sastava, ugljični (nelegirani) ili legirani, niskolegirani ili visokolegirani, te prema vrsti legiranih elemenata razlikujemo Cr, Ni, Mn, Si, W, Mo, V-čelike ili Cr-Ni, Cr-No, Cr-Mn, Si-Mn čelike i sl. [2].

Prema mikrostrukтури čelik se dijeli na austenitni čelik, martenzitni čelik, feritni čelik s feromagnetnim svojstvima, perlitni čelik s visokim stupnjem kaljivosti i velikim mogućnostima oplemenjivanja, ledeburitni čelik koji sadrži željezni karbid ili tvrde karbide volframa, bainitni čelik i sl.

Prema kvaliteti razlikuju se obični, kvalitetni i plemeniti čelici te čelici posebnih svojstava. Obični je čelik nelegiran, kvalitete za koju prilikom proizvodnje nisu potrebne posebne mjere. Pod kvalitetnim čelikom podrazumijevaju se nelegirane i legirane vrste čelika za koje općenito nije potrebna toplinska obrada, ali prilikom proizvodnje treba postići određenu kvalitetu površine, strukturu i žilavost (npr. čelik za tračnice, građevinski čelik i sl.). U plemeniti čelik ubrajaju se nelegirane i legirane vrste čelika koje posebna svojstva stječu toplinskom obradbom, a zbog specijalnih uvjeta proizvodnje imaju veći stupanj čistoće od kvalitetnih čelika (npr. alatni čelik,

čelik otporan na toplinu itd.). U čelike posebnih svojstava ubrajaju se čelici otporni prema visokoj temperaturi, koroziji, starenju i sl. [3].

Prema namjeni čelik se dijeli na konstrukcijski (obični, poboljšani), specijalni, alatni (za rad u toplom i hladnom stanju, brzorezni), čelik za cijevi, za opruge, za kotrljajuće ležajeve, za transformatore i dr. Čelični proizvodi dolaze na tržište u različitim oblicima (trake, široke plosnate šipke, lim, profili, žica i dr.) [3].

Budući da je suvremena proizvodnja čelika bazirana na čeličnom otpadu kao jednoj od glavnih sirovina cilj ovog završnog rada je detaljnije opisati kvalitetu i vrstu čeličnog otpada, njegovu pripremu te ukratko objasniti tijek procesa koji koriste čelični otpad za proizvodnju čelika.

2. OPĆENITO O ČELIKU

2.1. Definicija čelika

Kada se željezo (Fe) nalazi u čistom obliku, tada nije za tehničku uporabu i služi samo za specijalne namjene. Sam proces proizvodnje čistog željeza je težak i skup proces. U usporedbi s čistim željezom, čelik ima bitno bolja mehanička svojstva, a zbog toga i šire područje primjene u svim industrijskim granama, kao i za potrebe u svakodnevnom životu ljudi [4].

Definicija čelika mijenjala se tijekom vremena. Prema definiciji europske norme čelik je željezni materijal koji je pogodan za toplu preradu [5]. Glavni sastojak čelika je ugljik, te on u znatnoj mjeri određuje njegova svojstva. Čelik se može definirati i kao željezna legura s najviše 2 % masenog udjela ugljika i nizom drugih elemenata (mangan, silicij, sumpor, fosfor itd.). Čelik je Fe-legura koja pored ugljika sadrži i brojne primjese. Primjese u čeliku mogu biti korisne (krom, nikal, molibden itd.) i štetne (uglavnom sumpor i fosfor). Čelik sadrži i oligoelemente (bakar, kositar, arsen itd.) i plinove (kisik, dušik, vodik) koji u pravilu pogoršavaju njegova svojstva.

Čelik se uglavnom koristi zbog svojih dobrih svojstva kao što su čvrstoća, žilavost, rastezljivost, spojivost, mogućnost oblikovanja deformiranjem, mogućnost promjene sastava legiranjem, toplinskom obradom itd. Svojstva čelika uvjetovana su određenim svojstvima čistog željeza (posebice polimorfija), prirodom i masenim udjelom pratećih elemenata te odnosom između željeza, pratećih i legirajućih elemenata. Temeljna svojstva čelika određena su kemijskim sastavom, mikrostrukturom te stanjem, oblikom i dimenzijama proizvoda. Zbog svojih brojnih svojstava i ekonomičnog načina proizvodnje, čelik ima mnogobrojnu i raznovrsnu uporabu. Proizvodnja čelika na godišnjoj razini ukazuje da se bez čelika današnja razina tehnike i tehnologije ne može zamisliti.

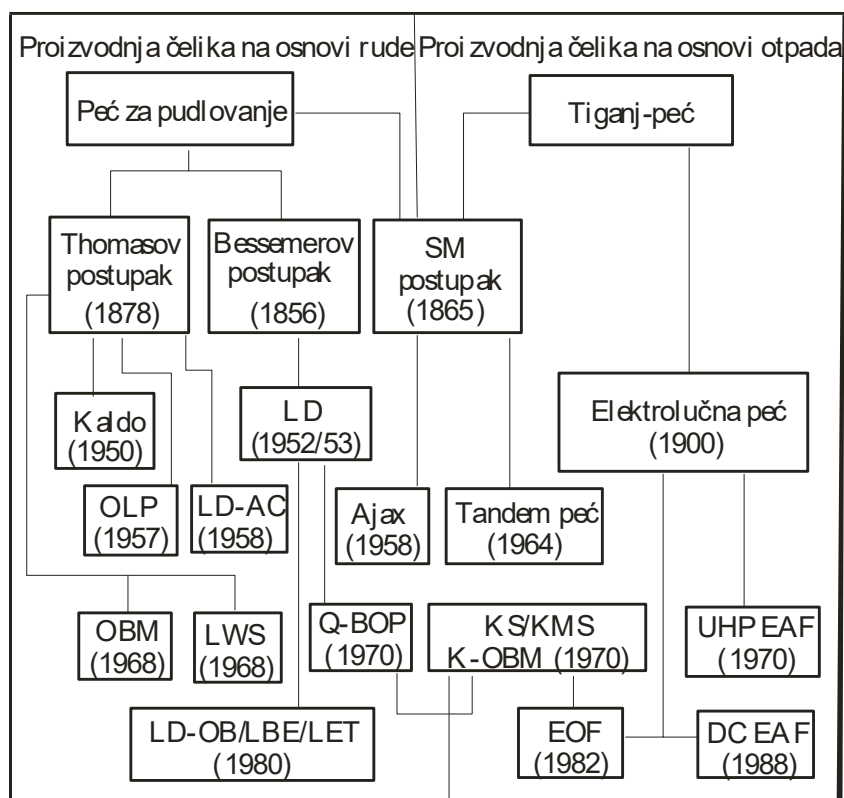
2.2. Povijesni pregled izrade čelika

Još u antičkim vremenima ljudi su znali kako dobiti željezo i kako od njega napraviti alat. U doba faraona, u Egiptu su ljudi koristili željezo za izradu oružja i alata. Dobivanje željeza započelo je u maloj Aziji, iako postoji mogućnost da je započelo na više različitih mjesta (jugoistočna Europa, južna Indija, Kina, zapadna Afrika). Kao prapovijesni postupci dobivanja čelika smatraju se pudlovanje i proizvodnja u tiganj pećima. Prvi put je 1740. godine dobiven tekući čelik u posudama (loncima) od vatrostalnog materijala (*Crucible proces*).

Na slici 1 prikazan je povijesni tijek proizvodnje čelika, a uključuje i prve godine industrijske primjene pojedinog postupka. Henry Bessemer je 1856. godine predložio jednostavan i jeftiniji postupak za masovnu proizvodnju lijevanog čelika, a proizvodnja se odvijala procesom propuhivanja rastaljenog sirovog željeza zrakom. Proces se odvijao u specijalnom konvertoru obloženom kiselim vatrostalnim materijalom. Za proces se koristilo sirovo željezo s povišenim sadržajem silicija. Prvo iskustvo H. Bessemera s metalnim materijalima bilo je u tiskari njegova oca. Od 1838. do 1883. godine Bessemer je patentirao 117 pronalazaka, a njih 37 je neposredno vezano za proizvodnju željeza i čelika. Najvrijedniji patent bio je 12. veljače 1856. godine pod nazivom "*Manufacture of melleable iron and steel*" (*Izrada kovkog željeza i čelika*) te taj patent predstavlja revolucionarni doprinos razvoju procesa proizvodnje čelika [6]. U Engleskoj je 1974. godine postavljen posljednji uporabljeni 25-tonski Bessemerov konvertor, koji služi kao eksponat u otvorenom muzeju u Scheffieldu.

U Francuskoj su 1856. godine Emile i Pierre Martin uspjeli dobiti čelik u peći s otvorenim ognjištem iz sirovog željeza i čeličnog otpada (starog željeza). Iskorišten je princip predgrijavanja goriva i zraka toplinom otpadnih plinova u regeneratorima koje je razvio C. W. Siemens. Postupak je poznat pod nazivom Siemens-Martinov (SM) postupak.

Početak 20. stoljeća dolaze brojni prijedlozi za iskorištenje električne energije pri proizvodnji sirovog željeza i čelika. U proizvodnji je puštena elektrolučna peć (ELP) za recikliranje jeftinog čeličnog otpada. Pedesetih godina prošlog stoljeća primjena kisika u proizvodnji čelika postala je uobičajena praksa, posebice primjenom LD (*Linz-Donawitz*) kovertorskog postupka.

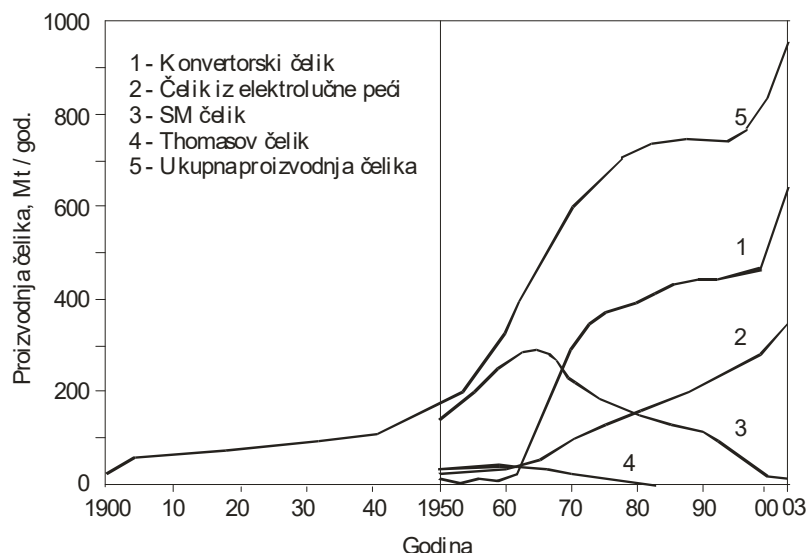


Slika 1. Prikaz povijesti proizvodnje čelika [4]

U posljednje vrijeme pojavili su se brojni procesi pretaljivanja: vakuum-indukcijsko pretaljivanje, vakuum-lučno pretaljivanje, različite izvedbe pretaljivanja pod troskom, pretaljivanje elektronskim snopom i plazma-lučne peći [7]. Kao uložak u ovim procesima koriste se gređice čelika koje su već dobivene u nekim od uobičajenih postupaka.

Čelik se podvrgava vakuumskoj obradi (degazacija-otplinjavanje), obradi tekućim ili praškastim smjesama ili ferolegurama, elektromagnetskom mješanju itd., radi uklanjanja štetnih primjesa te zbog izjednačavanja sastava i temperature u loncu. Svi navedeni postupci poznati su pod zajedničkim imenom “sekundarna metalurgija” ili “proces dorade čelika u loncu” [8,9].

Od 1950. do 1975. godine zabilježen je najveći porast proizvodnje čelika. Tada je proizvodnja čelika povećana s 240 na 700 Mt, a to je za 2,9 puta. Tijekom 50-ih i 60-ih godina 20. stoljeća godišnja proizvodnja čelika je porasla za oko 6% (slika 2). U drugoj polovici 20. stoljeća došlo je, zbog naftne krize, do smanjenja proizvodnje čelika u svim dijelovima svijeta. Dolazi do porasta proizvodnje čelika i u Aziji (posebice u Kini), te je tada kompenzirana smanjena proizvodnja čelika u državama istočne Europe. Posljednji 20 - tak godina proizvodnja čelika u svijetu pokazuje porast [10].



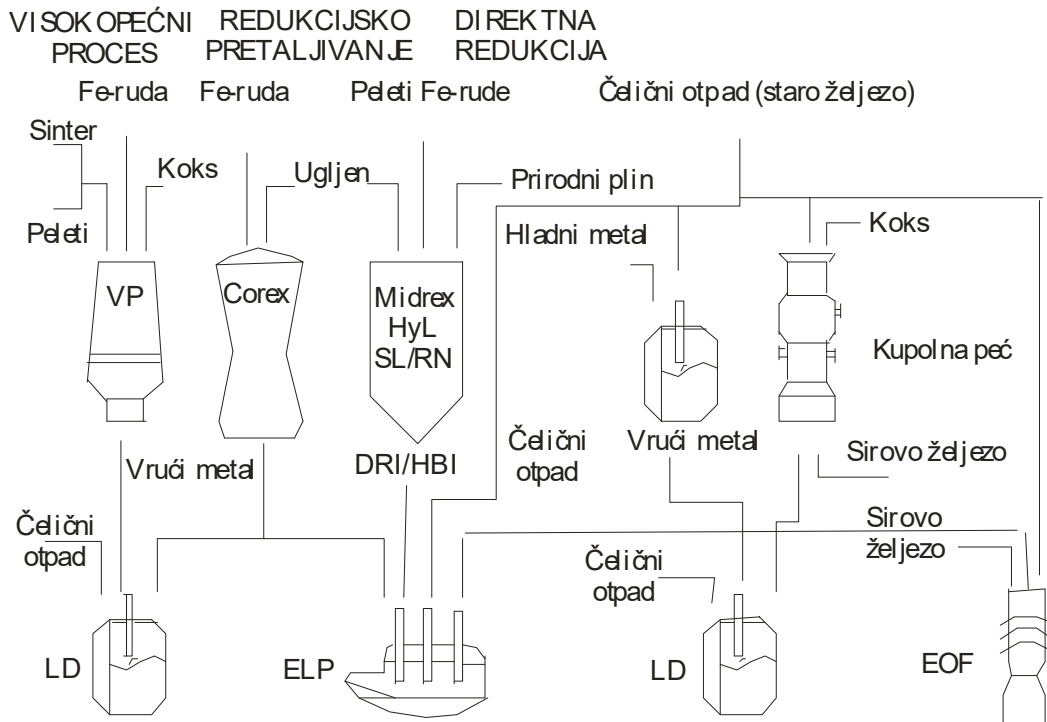
Slika 2. Prikaz proizvodnje čelika u 20. stoljeću [4]

2.3. Moderni postupci proizvodnje čelika

Proizvodnja čelika može se provoditi na različite načine, ovisno o raspoloživim sirovinama, cijeni i energiji. Najbolje bi bilo kada bi se čelik proizveo direktno iz Fe-rude, no to još uvijek tehnički nije moguće.

Danas se sirovo željezo, koje je primarni uložak za proizvodnju čelika ne dobiva samo u visokim pećima, nego se sve više koristi kruto “spužvasto željezo” (postupak direktne redukcije Fe-rude) i “vrući metal” (postupak redukcijskog taljenja). U svijetu je početkom ovog stoljeća udio sirovog željeza u metalnom punjenju za proizvodnju čelika iznosio 57,7%, čeličnog otpada oko 38%, a proizvoda direktne redukcije 4,3%. Osnovni načini izrade čelika su prikazani slikom 3 te se mogu podijeliti u dvije glavne grupe:

- a) Proizvodnja čelika u integralnim željezarama. U proizvodnji se koristi Fe-ruda, koja može biti sinterirana ili peletizirana. Koksom metalurgijom se u visokoj peći dobiva sirovo željezo koje se s recikliranim čeličnim otpadom, u kisikovim konvertorima prerađuje u čelik. Danas željezare imaju visoke peći koje dnevno proizvode oko 12 kt tekućeg sirovog željeza koje se u modernim kisikovim konvertorima prerađuje u čelik, te se godišnje dobije preko 10 Mt čelika [11].
- b) Pretaljivanje čeličnog otpada bez ili s nekim od proizvoda direktne redukcije. Postupkom direktne redukcije godišnje se proizvede preko 40 Mt direktno reduciranih proizvoda. Ovim načinom rada izbjegava se tzv. koksna metalurgija [12]. Na ovaj način se proizvode visokokvalitetni čelici uz znatno manji udio oligoelemenata (posebice bakra).



Slika 3. Shematski prikaz različitih puteva i kombinacija za proizvodnju čelika [4]

Agregati u proizvodnji čelika različitog su oblika te su prilagođeni prirodni tehnološkog procesa. Kao oksidans kisikovi konvertori koriste tehnički čisti kisik (iznad 99,5 %) koji se u rastaljeno sirovo željezo dovodi odozgo kroz vodom hladeno koplje ili odozdo kroz sapnice. Kombinirano propuhivanje u kisikovom konvertoru ima veću metaluršku fleksibilnost i zbog toga se brže postiže približavanje fizikalno-kemijske ravnoteže. Danas primjena sekundarne metalurgije omogućava poboljšanje kakvoće, proširenje programa proizvodnje te veliku fleksibilnost tehnološkog procesa [12]. Zadnjih dvadesetak godina u svijetu se na kisikove konvertore propuhivane odozgo odnosilo oko 86 % ukupno proizvedenog konvertorskog čelika, a na konvertore propuhivane odozdo i kombinirano propuhivane oko 12 %.

Kod elektrolučnih peći, proizvodnja čelika se uglavnom odvija pretaljivanjem čeličnog otpada. U geografski manjim državama čelik se proizvodi samo u elektrolučnim pećima, gdje se čelični otpad korisnije preradi u čelik nego da ga se izvozi kao otpad [13]. Danas se visokoučinske elektrolučne peći grade s potpuno pripadajućom opremom za osiguravanje kakvoće i zaštite okoliša. Proizvodnja čelika preko elektrolučne peći je ekološki prihvatljivija opcija [13].

Neovisno o načinu proizvodnje, čelik se izravno lijeva u ingote (rijetko, pretežito visokolegirani čelici) ili u kontinuirano lijevane "žile". Zadnjih dvadesetak godina udio kontinuiranog lijevanja u zapadnoeuropskim državama iznosi oko 90% te se takav čelik prerađuje u krajnji proizvod valjanjem, kovanjem ili vučenjem, uključujući i horizontalno kontinuirano lijevanje specijalnih čelika. U praksu se uvodi

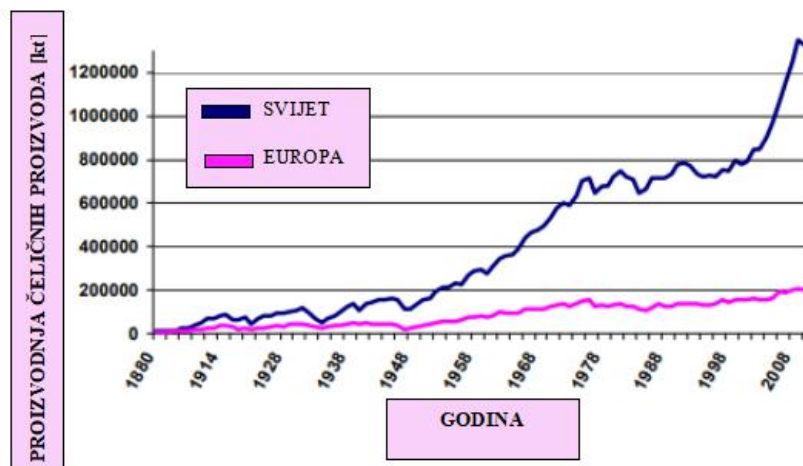
i tzv. valjanje u liniji, što konvencionalni postupci kontinuiranog lijevanja ne omogućuju zbog male brzine lijevanja [14].

3. PROIZVODNJA ČELIKA

3.1. Pregled proizvodnje čelika u svijetu

Željezo i čelik su nekoliko tisućljeća imali važnu ulogu u razvoju ljudske civilizacije i našli su primjenu u poljoprivredi, građevinarstvu, proizvodnji strojeva i opreme i drugim industrijskim granama. Zajedno s ugljenom i pamukom, željezo i čelik bili su glavni materijali na kojima se temeljila industrijska revolucija. Tehničkim razvojem s početka osamnaestog stoljeća omogućeno je značajno povećanje proizvodnje čelika, npr. zamjenom relativno siromašnog drvenog ugljena s tvrdim ugljenom/lignitom i koksom te razvojem novih procesa obrade za proizvodnju čelika [15].

Svjetska proizvodnja čelika znatno se povećala od 2000. godine i premašila 1000 milijuna tona prvi put 2004. godine. U 2006. godini, svjetska proizvodnja čelika porasla je na više od 1200 milijuna tona (slike 4 i 5). Glavni razlog je taj što se proizvodnja čelika u Kini povećala s 127 milijuna tona na 421 milijuna tona u 2006. godini [15]. U 2018. godini proizvodnja čelika u svijetu je porasla na 1,816 milijardi tona, pri čemu se pola proizvodnje (točnije 928,3 milijuna tona) odnosi na proizvodnju u Kini [10, 16].

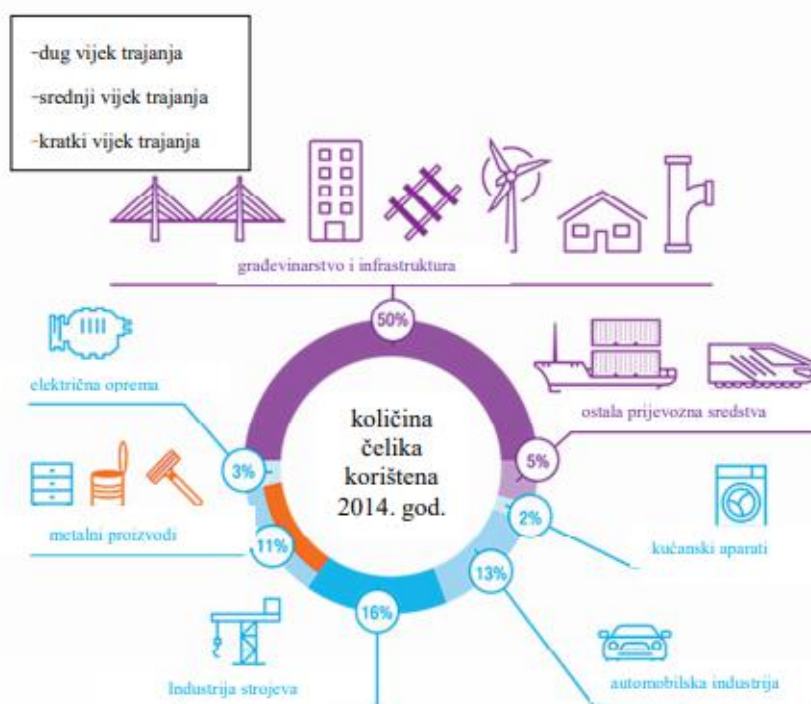


Slika 4. Proizvodnja sirovog čelika u Europi i svijetu od kraja 19. st. do početka 21. st. [15]



Slika 5. Proizvodnja sirovog čelika u Europi i svijetu početkom 21. st. [2]

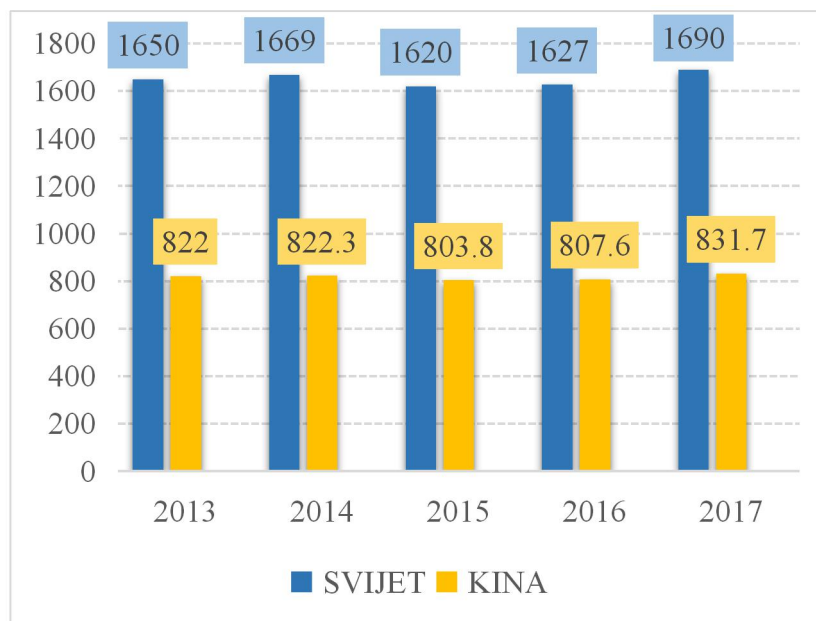
Čelik se upotrebljava u različitim područjima ljudske djelatnosti. Najveći udio čelika se koristi u sektoru građevinarstva i infrastrukture (koriste oko 50% proizvednog čelika). Automobilaska industrija i industrija strojeva troše oko 30% godišnje proizvodnje čelika. Na kraju dolazi proizvodnja čeličnih proizvoda, ostalih prijevoznih sredstava, te električne opreme i kućanskih uređaja (slika 6).



Slika 6. Prikaz primjene čelika u 2014. godini [2]

Gledajući ključne zemlje i regije npr. u 2017. godini, postignuta kineska proizvodnja čelika bila je 831,7 milijuna tona (+ 3% u odnosu na prethodnu godinu), što je u ukupnoj svjetskoj proizvodnji iznosilo 49,2 % (slika 7, tablica 1). Navedene

brojke pokazuju da je Kina globalna velesila u proizvodnji čelika, odnosno u ukupnoj gospodarskoj djelatnosti.



Slika 7. Svjetska proizvodnja sirovog čelika (milijuna tona) [15]

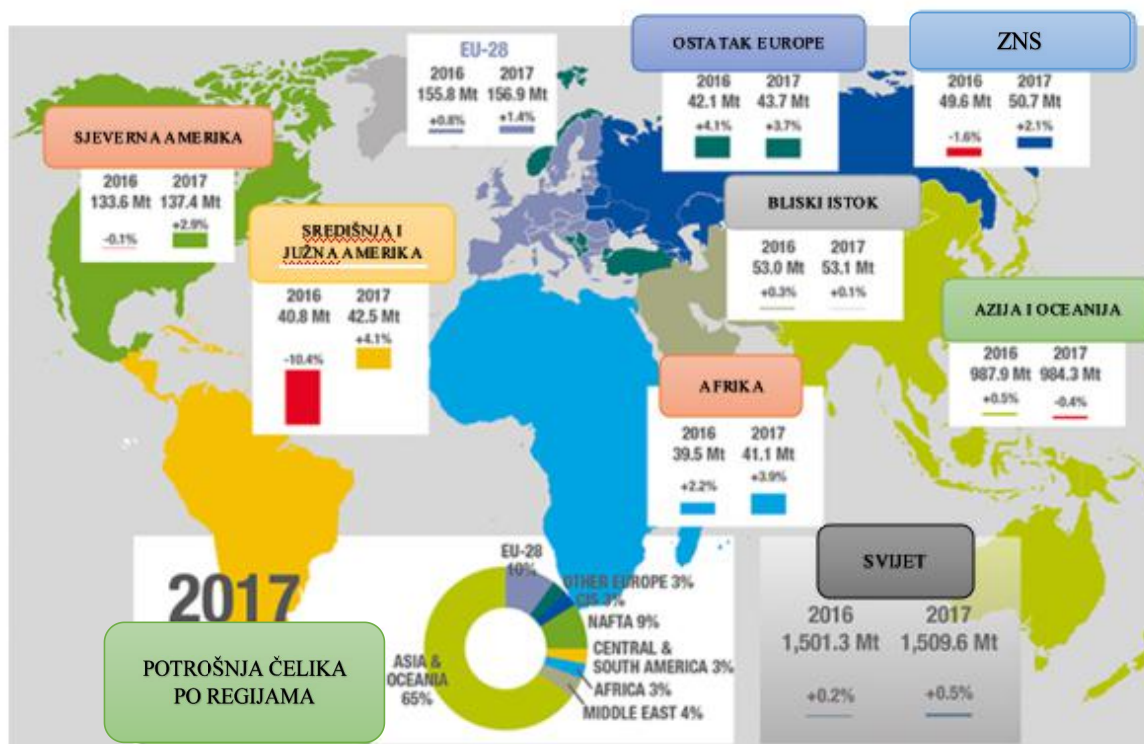
U tablici 1 prikazana je svjetska proizvodnja sirovog čelika po regijama u razdoblju od 2013. g do 2018. g.

Tablica 1. Svjetska proizvodnja sirovog čelika 2013.-2018. god. (milijuna tona) [10,15]

	2013.	2014.	2015.	2016.	2017.	2018.
EUROPSKA UNIJA (28)	166,4	169,3	166,12	162,0	168,1	167,7
OSTALA EUROPA	38,6	38,4	35,8	37,7	42,3	42,4
ZND	108,4	106,1	101,6	102,1	102,1	100,9
SJEVERNA AMERIKA	118,98	121,1	110,9	110,6	115,7	120,9
JUŽNA AMERIKA	45,8	45,1	43,9	40,2	43,7	44,9
AFRIKA	15,96	14,9	13,7	13,1	15,1	17,4
BLISKI ISTOK	26,97	29,99	29,43	31,5	34,5	38,0
AZIJA + Kina	1123,65	1139,2	1112,9	1123,9	1162,9	1278,0
KINA	822,0	822,3	803,8	807,6	831,7	928,3
OCEANIJA	5,6	5,5	5,7	5,8	6,0	6,3
SVIJET	1650	1669	1620	1627	1690	1816

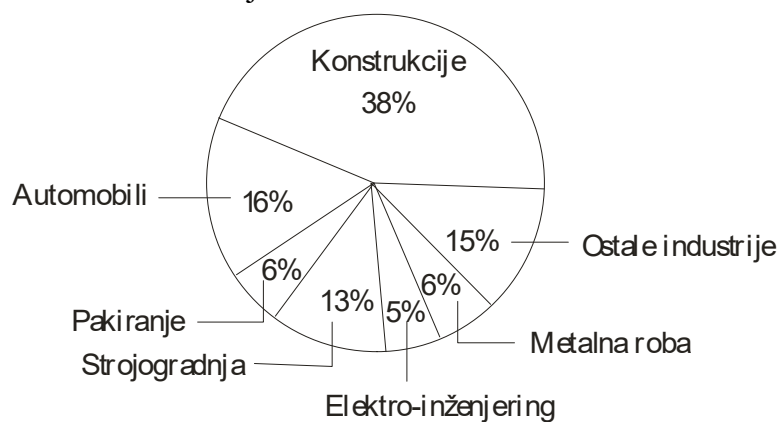
*ZND- Zajednica nezavisnih država bivšeg SSSR-a

Na slici 8 prikazana je godišnja potrošnja čelika za 2016. i 2017. godinu. Nakon smanjenja od -3,0 % u 2015. godini, u 2016. godini globalna potrošnja čelika povećala se za 0,2 % na 1,501 Mt., a 2017. godine globalna potrošnja čelika porasla je za 0,5 % na 1,510 Mt [10].



Slika 8. Godišnja potrošnja čelika za 2016. i 2017. godinu [10]

Potrošnja čelika u svijetu niža je za oko 100 Mt od proizvodnje. Čelik je glavni materijal u konstrukcijama (38 %), industriji automobila (16 %), strojogradnji (13 %), industriji ambalaže i opreme itd. (slika 9). Pretpostavlja se da će se u budućnosti postići još bolja svojstva čelika, njegova izrada će biti jeftinija i povećati će se njegova produktivnost. Takvim pristupom otvoriti će se nova tržišta i zadržati profitabilnost čeličanske industrije.



Slika 9. Shematski prikaz potrošnje čelika po sektorima [2]

3.2. Čelik i čelični otpad u budućnosti

U posljednjih 20-ak godina došlo je do promjena u proizvodnji čelika. Proizvodnja čelika u SM peći izgubila je značenje zbog niske produktivnosti i ekoloških zahtjeva.

Za proizvodnju čelika postoje dva rješenja. Postojeći proizvodni sustavi moraju se razviti te tražiti prihvatljiva rješenja na području primjene direktno reduciranih proizvoda, sekundarne metalurgije kao i smanjenju sadržaja oligoelemenata u čeliku i razvoju novih postupaka kontinuirane izrade čelika. Očekuje se poboljšanje postojećih agregata za proizvodnju čelika, smanjenje potrošnje energenata, kraće vrijeme rafinacije i veći stupanj automatizacije.

U budućnosti će primarni način proizvodnje čelika i dalje biti u kisikovim konvertorima, posebice za plosnate proizvode [17]. Trenutno ne postoji tehnologija kojom bi se zamijenili kisikovi konvertori. Proizvodnja čelika u elektrolučnim pećima s globalne se perspektive u budućnosti može približiti proizvodnji u kisikovim konvertorima, ali je ne može zamijeniti [18]. Razlog tomu je brzina odugljičenja koja je u konvertorima 4-6 puta veća nego u elektrolučnim pećima istog unutarnjeg promjera agregata.

Sva čelična prašina i ogorine iz valjaonice u budućnosti će se značajnije reciklirati. Doći će do intenzivnijeg razvoja proizvodnje čelika pomoću istosmjerne struje (DC-peći). Kod DC-peći primjenom jedne elektrode oslobađa se više prostora za veći stupanj automatizacije pri izradi čelika. Alternativa današnjih kisikovitih konvertora mogao bi biti konstruirani kontinuirani proces, a energetska optimizirana elektrolučna peć mogla bi biti povoljna opcija za izradu čelika s velikim udjelom čeličnog otpada (oko 50 %).

U skoroj budućnosti izjednačiti će se količine čelika proizvedene u kisikovim konvertorima i one iz elektrolučnih peći. Čelični otpad i dalje će ostati dominantan uložak za elektrolučnu peć, a stupanj recikliranja će se povećati s 45 % na 55 %.

Problem čelika iz elektrolučne peći potječe od udjela oligoelemenata, najviše bakra, kositra, antimona itd. [19]. Za vrijeme procesa taljenja ti se elementi ne mogu ukloniti. U bližoj budućnosti se ne očekuje nova tehnologija koji bi smanjila udio bakra u čeliku. Rješenje ovog problema je razrjeđivanje metalne taline proizvodima direktne redukcije (DRI/HBI proizvodi) ili tekućim sirovim željezom.

Za ispunjenje ekoloških kriterija rada čeličane, troškovi iznose oko 15% ukupne investicije izgradnje nove čeličane. Najpogodniji način za smanjenje emisije CO₂ je proizvodnja čelika u elektrolučnoj peći. U elektrolučnoj peći je potrebna niža energija za taljenje čeličnog otpada nego za taljenje željezne rude. Zbog bolje pripreme čeličnog otpada očekuje se smanjenje prašine u otpadnom plinu s 17 na 15 kg/t čelika.

Broj zaposlenih u industriji čelika se smanjuje radi primjene novih i djelotvornijih tehnologija te visokosofisticirane kontrole odvijanja procesa (oko 50 % ukupno proizvedenog čelika će se izvoziti). Posljedica toga je širenje internacionalne specijalizacije u poduzetništvu čelika te će tvrtke usmjeravati maksimalnu pozornost na one proizvode koji imaju komparativnu prednost.

3.3. Podjela i označivanje čelika

Čelici se dijele prema načinu proizvodnje, kemijskom sastavu, stupnju dezoksidacije, načinu lijevanja, mikrostrukтури, obliku i stanju čeličnih poluproizvoda, području primjene, svojstvima itd. Prema primarnom načinu proizvodnje današnji čelici mogu biti konvertorski, elektročelik, čelik dobiven pretaljivanjem, SM čelik (gotovo napušten). S obzirom na sekundarnu metalurgiju čelik se može dobiti vakuumskim otplinjavanjem, u lonac-peći itd.

Čelici prema kemijskom sastavu mogu biti nelegirani (ugljični) ili legirani. Prema sadržaju ugljika mogu biti niskougljični, srednjeugljični i visokougljični čelici. U tablici 2 prikazan je udio elemenata za legirani čelik prema europskim normama. Legirani čelik je onaj koji sadrži jedan ili više elemenata čiji maseni udio prelazi vrijednosti navedene u tablici 2. Prema vrsti legirajućih elemenata čelici mogu biti jednostruko (Cr, Mn, Si, W, Mo, V-čelici) ili višestruko legirani (npr. Cr-Ni, Cr-Mn, Cr-Mo, Si-Mn ili Cr-Ni-Mo, W-Cr-V čelici). Prema sumi legirajućih elemenata čelici mogu biti niskolegirani (manje od 5 %), visokolegirani (iznad 5 %) i mikrolegirani (manje od 0,1 % nobija, vanadija, titana, bora, cirkonija i dr.). Prema stupnju kvalitete čelici mogu biti masovni, kvalitetni (ujednačene kvalitete) i plemeniti (visoke kvalitete).

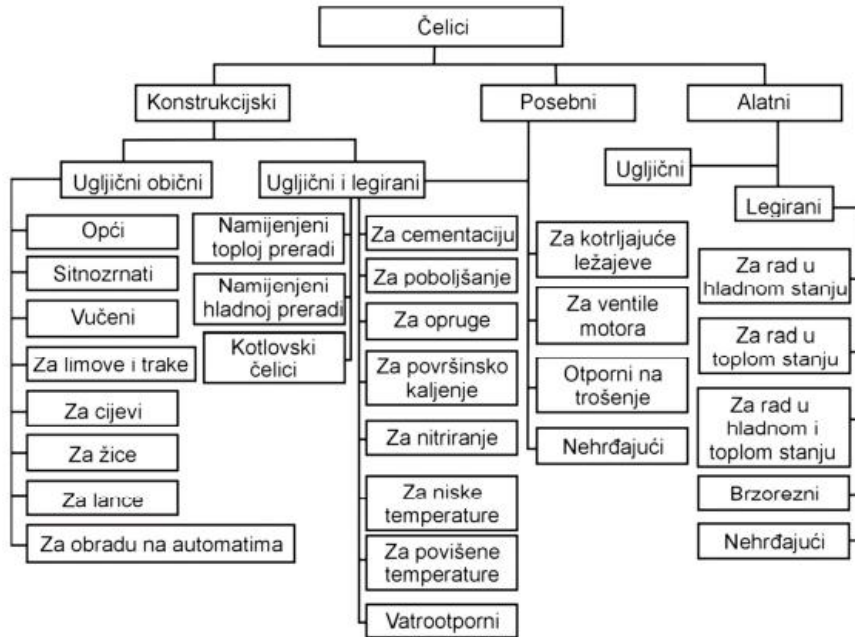
Tablica 2. Granični maseni udjeli elemenata koji odjeljuju nelegirane od legiranih čelika [20]

Leg. element	Si	Mn	Cr, Ni	Mo	Al, Co, W, V	Se, Te	Nb, Ti, Zr	Cu, Pb	Ce, Nd, Er	Ostali (izuzev C, P, N, O)
mas. %	0,50	1,60	0,30*	0,08	0,10*	0,10*	0,05*	0,40*	0,05*	0,05*

* - Vrijedi za svaki element pojedinačno

Čelici prema stupnju dezoksidacije mogu biti umireni, poluumireni i neumireni, a prema načinu lijevanja mogu biti klasično i kontinuirano odliveni čelici.

Osnovni čelični poluproizvodi su limovi, trake, šipke, cijevi, profili itd., a prema stanju isporuke mogu biti toplo valjani, hladno valjani, lijevani, hladnovučeni, kovani, toplinski obrađeni itd. Slikom 10 shematski je prikazana podjela čelika prema namjeni.



Slika 10. Podjela čelika prema namjeni [21]

Prema primjeni čelici mogu biti konstrukcijski za opću namjenu (nosive zavarene konstrukcije, strojni elementi i dijelovi) ili za posebna svojstva primjene (vatrootporni, kemijski otporni, otporni na trošenje), alatni čelici (za rad u hladnom ili toplom stanju, brzorezni čelici), čelici za elektro industriju, cijevi itd.

Pojedini čelici ili podskupine čelika posjeduju istaknuta svojstva kao npr. povišena granica razvlačenja i vlačna čvrstoća, žilavost pri niskim temperaturama, kemijska otpornost, otpornost na trošenje itd.

Od 1991. godine prema europskoj normi EN 10027-1 označivanje čelika provodi se slovnim oznakama i brojevima koji dokazuju njegovu primjenu i glavne značajke (npr. mehanička i fizikalna svojstva te kemijski sastav). Oznake čelika sastoje se od tri dijela: glavne oznake, dodatne oznake za čelik te dodatne oznake za proizvode od čelika.

Glavne oznake, namjena te mehanička i fizikalna svojstva definirane su kroz 11 skupina čelika. Prema kemijskom sastavu označivanje čelika definirano je kroz 4 skupine. Označivanje čelika prema namjeni, mehaničkom ili fizikalnim svojstvima te prema kemijskom sastavu navedeno je u odgovarajućim tablicama, u literaturi [22].

4. SIROVINE ZA PROIZVODNJU ČELIKA

Za proizvodnju čelika koristi se metalni materijal (metalno punjenje), pomoćni materijali (talitelji) i oksidansi. Metalno punjenje sadrži sirovo željezo, čelični otpad, produkte direktne redukcije Fe-rude i ferolegure.

U izradi čelika udio sirovog željeza i čeličnog otpada ovisi o brojnim čimbenicima, a najviše o postupku proizvodnje čelika. Kod konvertorskog postupka proizvodnje čelika kao uložak koristi se 70-85 % sirovog željeza, a ostatak je čelični otpad. U elektrolučnoj peći udio sirovog željeza je mali (ispod 5%) te se za metalno punjenje uglavnom koristi čelični otpad i proizvodi direktne redukcije ili redukcijskog taljenja. Kod proizvodnje čelika SM postupkom udio sirovog željeza je 55 %, a ostatak je čelični otpad.

Suvremena proizvodnja čelika sastoji se od tri vrste metalnog uložka: sirovo željezo, čelični otpad i direktno reducirano željezo. Primarne sirovine za proizvodnju čelika su sirovo željezo i produkti direktne redukcije, dok čelični otpad predstavlja sekundarnu sirovinu [23].

4.1. Primarne sirovine

Osnovna sirovina za proizvodnju čelika je sirovo željezo. Dobiva se u visokoj peći iz željezne rude. U peći se dobiva vrući metal, a njegova kvaliteta ovisi o punjenju, načinu rada i njegovoj daljnjoj primjeni. Proizvedeno sirovo željezo može biti bijelo i sivo, ovisno o boji prijelomne površine. Sirovo željezo namijenjeno izradi odljevaka može biti hematitno (za odljevke od sivog lijeva), željezo za proizvodnju nodularnog ili sferoidiziranog grafitnog lijeva i specijalno sirovo željezo [23]. Bijelo sirovo željezo može biti različite kvalitete, ovisno o uvjetima rada i sastavu (sadržaj mangana, fosfora, sumpora). Ugljik u bijelom sirovom željezu obično sadrži oko 4,0 mas. %.

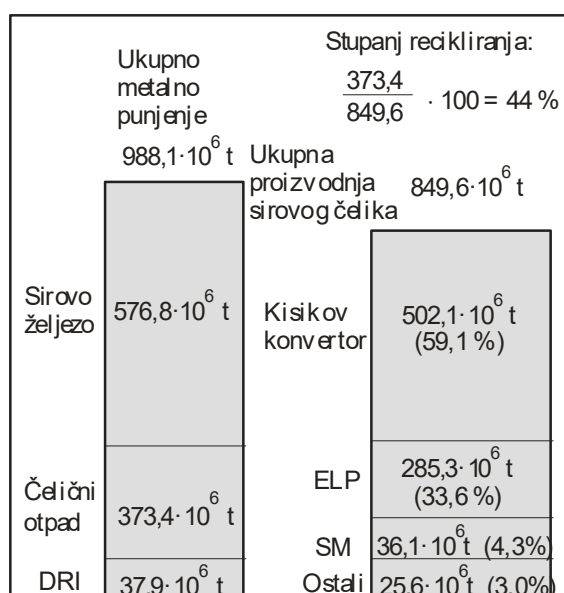
Problem pri izradi čelika elektrolučnim postupkom čini sadržaj primjesa. U prvom redu se to odnosi na oligoelemente koji dolaze iz čeličnog otpada (Cu, Sn, As, Cr, Ni, Mo itd.). Proces direktne redukcije Fe-rude i redukcijskog taljenja imaju određene prednosti u odnosu na proizvodnju sirovog željeza u visokoj peći. Proces direktne redukcije daju metalno željezo u krutom obliku, dok procesi redukcijskog taljenja daju vrući metal.

4.2. Čelični otpad

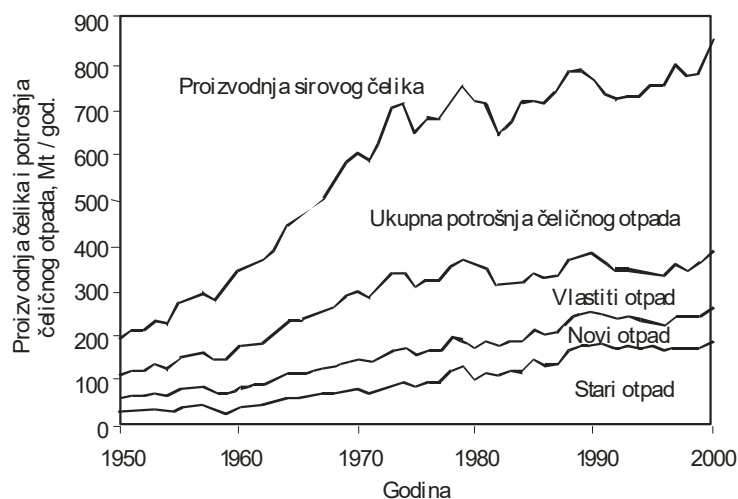
Procjenjuje se da su rezerve željezne rude pri postojećoj dinamici eksploatacije dovoljne za narednih 170 godina [24]. Značaj čeličnog otpada sve više raste jer se on lako prerađuje u čelik. Na taj način se za buduće generacije štede energija i sirovine.

Početakom 2000-ih proizvedeno je oko 850 Mt sirovog čelika, a za njegovu proizvodnju je korišteno oko 370 Mt čeličnog otpada. Stupanj recikliranja iznosio je približno 44 % (slika 11). Države EU tada su proizvele oko 160 Mt sirovog čelika uz potrošnju oko 90 Mt čeličnog otpada. Recikliranje čelika u EU je tada bilo veće od svjetskog prosjeka i iznosilo je oko 56 % [25]. Međutim, u novije vrijeme raste stupanj recikliranja čelika i na svjetskoj razini.

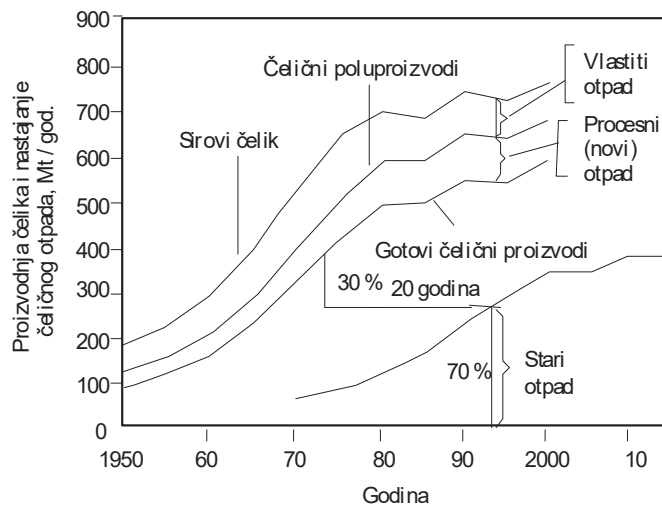
Čelični otpad je ustvari najčešće čelik koji je u obliku nekog proizvoda završio svoj “životni vijek” te se koristi kao sekundarna sirovina za proizvodnju novog čelika u čeličanicama i lijevanih željeza u ljevaonicama. Čelični se otpad dijeli u klase, obično prema podrijetlu i po kvaliteti [23]. Prema podrijetlu čelični otpad može biti vlastiti, procesni i stari ili amortizirani otpad (slike 12 i 13). U proizvodnji čelika pomoću elektolučne peći čelični otpad je najvažnija sirovina te predstavlja 60-80 % ukupnih troškova proizvodnje [26].



Slika 11. Sastav uloška za proizvodnju čelika i stupanj recikliranja u svijetu u 2001. godini [10]



Slika 12. Odnos proizvodnje čelika i potrošnje čeličnog otpada u svijetu [10]



Slika 13. Odnos proizvodnje čelika i potrošnje čelika te nastajanja čeličnog otpada u svijetu [10]

Najkvalitetniji otpad je stari čelični otpad. On se sastoji od čeličnih proizvoda odbačenih nakon uporabe (stari automobili, električni uređaji, poljoprivredna oprema, željezničke tračnice, konzerve za hranu i piće itd.). Stari otpad najvažniji je za tvrtke koje se bave sakupljanjem i pripremom jer regulira tržišne odnose ponude i potražnje, a time i cijenu. Prosječno se oko 70 % gotovih čeličnih proizvoda vrati u ciklus (recikliranje) nakon što su bili u uporabi tijekom 20 godina [27]. Gubitak od oko 30 % uglavnom je zbog korozije čelika.

4.2.1. Kvaliteta čeličnog otpada

Za recikliranje čeličnog otpada potrebna je složena priprema u cilju postizanja pogodne veličine komada i sniženja sadržaja štetnih primjesa. Bez odgovarajuće pripreme čeličnog otpada i bez poznavanja njegove kvalitete ne mogu se postići željeni rezultati rada elektrolučne peći bez obzira na njenu opremljenost [28].

Čelični otpad sadrži primjese koje su prisutne u tri oblika:

- 1) primjese u čistom stanju pomiješane sa željeznim komponentama čeličnog otpada koje se mehanički mogu odvojiti,
- 2) primjese korištene za nanošenje metalnih prevlaka na čeličnim proizvodima,
- 3) legirajući elementi prisutni kao otopljeni u volumenu čeličnog otpada.

Za proizvodnju što kvalitetnijeg čelika uveden je sustav gospodarenja čeličnim otpadom. Tijekom 90-ih godina 19. st. uveden je europski sustav klasifikacije čeličnog otpada (tablice 3 i 4). On predstavlja standard za definiranje kvalitete čeličnog otpada. Sustav vrijedi za nelegirane (ugljične) čelike pri čemu su definirani sigurnost, stupanj čistoće, dozvoljeni sadržaj primjesa i drugi tehnički parametri (dimenzija, nasipna gustoća).

Čelični otpad ne smije sadržavati posude pod tlakom ili nedovoljno otvorene posude (otvor manji od 100 mm) koje mogu dovesti do eksplozije, zapaljivi i eksplozivni materijal, vatreno oružje, municiju, radioaktivne materijale itd.

Što se tiče čistoće, čelični otpad mora biti bez ili sa što manje neželjeznih metala, nemetalnih materijala (guma, plastika, tkanina, drvo, ulje), zemlje itd. Svaki otpad mora biti relativno sitan (ne veći od komada veličine cigle) i bez komada koji ne provode elektricitet kao što su guma, cijev ispunjena cementom, drvo ili beton. Od pratećih su primjesa u čeličnom otpadu posebno bitni bakar, kositar, cink, olovo, krom, nikal, molibden itd. [29,30].

Čelični otpad ne smije sadržavati radioaktivne izvore i zračenjem kontaminirani otpad bilo koje vrste. Značajan napredak u svijetu je učinjen zadnjih 20-ak godina u instaliranju sustava za detekciju radijacije u čeličnom otpadu [30].

Tablica 3. Europska klasifikacija čeličnog otpada [23]

Vrsta otpada	Oznaka	Opis	Veličina	NG, t/m ³	SP
Stari otpad	E 3	Teški otpad pripremljen za ulaganja uključujući cijevi, šuplje profile, ali bez karoserija i kotača automobila, betonskog čelika, te Cu, Sn, Pb i njihovih legura.	Debljina ≥ 6 mm, dimenzije ≤1,5x0,5x0,5 m	≥ 0,6	≤ 1
	E 1	Laki čelični otpad pripremljen za ulaganje uključujući kotače automobila, ali bez karoserija, uređaja za domaćinstvo. Može biti bez betonskog i lakog šipkastog čelika, bez Cu, Sn i Pb i njihovih legura, te bez strojnih dijelova.	Debljina < 6 mm, dimenzije ≤1,5x0,5x0,5 m Max. do 1 m	≥ 0,5	≤ 1,5
Novi otpad	E 2	Teški novi otpad pripremljen za ulaganje, bez površinske zaštite. Ako nije drugačije dogovoreno onda i bez betonskog i šipkastog čelika. Otpad bez Cu, Sn i Pb i njihovih legura.	Debljina ≥ 3 mm, dimenzije ≤1,5x0,5x0,5 m	≥ 0,6	< 0,3
Niži sadržaj primjesa	E 8	Laki novi otpad pripremljen za ulaganje bez metalnih prevlaka. Ako nije drugačije dogovoreno bez "slobodnih" traka radi smanjenja problema pri ulaganju. Otpad bez Cu, Sn i Pb i njihovih legura.	Debljina < 3 mm, dimenzije ≤1,5x0,5x0,5 m (izuzev bunta traka)	≥ 0,4	< 0,3
(otpad bez metalnih prevlaka)	E 6	Laki novi otpad sabijen ili u obliku čvrstih paketa pripremljenih za ulaganje. Ako se drugačije ne dogovori otpad mora biti bez metalnih prevlaka. Otpad mora biti bez Cu, Sn i Pb i njihovih legura.	Debljina < 3 mm	≥ 1,0	< 0,3
Zdrobljeni otpad ("šreder" otpad)	E 40	Otpad usitnjen pripremljen za ulaganje, bez povišene vlage, sivog lijeva i otpada od spaljivanja komunalnog otpada (konzerve od bijelog lima). Otpad mora biti bez Cu, Sn i Pb i njihovih legura.	≤ 200 mm (95 %) ≥ 100 mm (5 %)	> 0,9	< 0,4
Čelična strugotina	E 5 H	Homogena slobodna strugotina ugljičnih čelika poznatog podrijetla pripremljena za ulaganje bez primjesa (neželjezni materijali, ogorina, prah od brušenja ili materijala iz kem. industrije).			*
	E 5 M	Pomiješana slobodna strugotina ugljičnih čelika pripremljena za ulaganje bez primjesa (obojeni metali, ogorina, prah od poliranja ili materijali iz kem. industrije).			*
Laki legirani otpad s visokim sadržajem primjesa	E H R B	Stari ili novi otpad (od betonskog čelika i lakih šipki) pripremljen za ulaganje. Može biti isječen ili paketiciran i bez većih količina betona i drugog građevinskog materijala. Otpad mora biti bez Cu, Sn i Pb i njihovih legura.	Max. 1,5x0,5x0,5 m	≥ 0,5	< 1,5
Otpad s visokim sadržajem ostataka	E H R M	Stari i novi dijelovi strojeva i komponenti koji nisu navedeni u drugim vrstama otpada. Može sadržavati sivi lijev (kućišta). Otpad mora biti bez Cu, Sn i Pb i njihovih legura, te bez strojnih dijelova (kućišta kugličnih ležajeva, prsteni od bronce).	Max. 1,5x0,5x0,5 m	≥ 0,6	< 0,7
Slomljeni otpad od spaljivanja komunalnog otpada	E 46	Rasuti čelični otpad iz postrojenja za spaljivanje komunalnog otpada nakon magnetne separacije (dio konzervi od bijelog lima) pripremljen za ulaganje, ali bez suviše vlage i oksida. Otpad mora biti bez Cu, Sn i Pb i njihovih legura.	≤ 200 mm	≥ 0,8	Fe ≥ 92 %

*- Ne postoje do danas metode za utvrđivanje ove vrijednosti, NG- nasipna gustoća, SP- ukupan sadržaj primjesa, mas. %

Tablica 4. Sadržaj primjesa za pojedinu vrstu čeličnog otpada, mas. % [29]

Vrsta otpada	Oznaka	Cu	Sn	Σ (Cr+No+Mo)	S
Stari otpad	E 3	< 0,25	< 0,01	< 0,25	
	E 1	< 0,40	< 0,02	< 0,30	
Novi otpad s niskim sadržajem primjesa, bez metalnih prevlaka	E 2		$\Sigma \leq 0,30$		
	E 8		$\Sigma \leq 0,30$		
	E 6		$\Sigma \leq 0,30$		
Zdrobljeni otpad	E 40	$\leq 0,25$	$\leq 0,02$		
Čelična strugotina	E 5 H				
	E 5 M	< 0,40	< 0,03	< 1,0	< 0,10
Otpad s visokim sadržajem pratećih elemenata	EHRB	$\leq 0,45$	$\leq 0,03$	$\leq 0,35$	< 0,10
	EHRM	$\leq 0,40$	$\leq 0,03$	$\leq 1,00$	
Zdrobljeni otpad nakon spaljivanja	E 46	$\leq 0,50$	$\leq 0,07$		

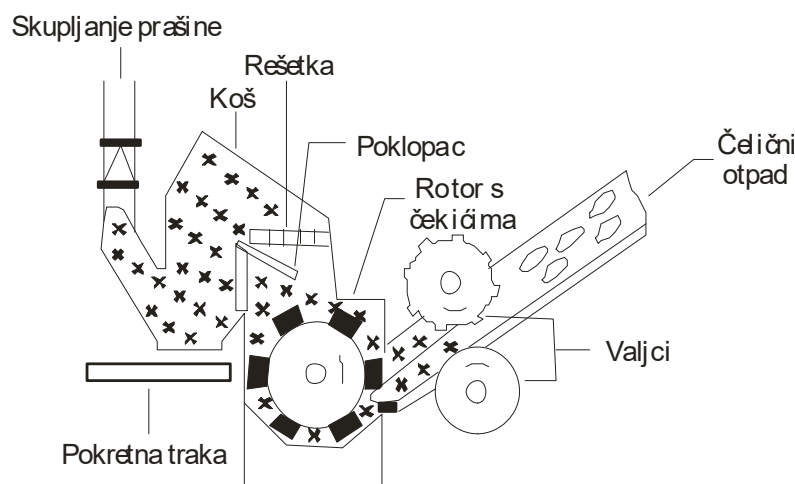
4.2.2. Priprema čeličnog otpada

Čelični otpad treba odgovarajuće pripremiti kako bi se postigla željena nasipna gustoća. Pripremom čeličnog otpada štedi se na potrošnji ferolegura i izbjegava mogućnost da se pokvari sastav novog čelika. Uklanjanje štetnih metalnih i nemetalnih primjesa često je teže nego podešavanje veličine komada [28].

Sadržaj bakra u čeličnom otpadu može se smanjiti sortiranjem otpada, razrjeđivanjem punjenja dodatkom sirovog željeza ili proizvoda direktne redukcije. Za sada je najefikasniji način smanjivanja sadržaja bakra u čeliku ručno uklanjanje i sortiranje. Kositar se iz pokositrenih limova uklanja elektrolitičkim postupkom. Cink tijekom izrade čelika isparava zbog visokog tlaka Zn-para (70 bara kod 1600°C).

Priprema vlastitog čeličnog otpada je najjednostavnija. U tom slučaju često zadovoljava samo rezanje komada (ručno ili škarama). Čelični otpad se može koristiti bez posebne pripreme (odresci, otpadni komadi), djelomično se mora pakirati (žica, traka), a može se i briketirati nakon odmašćivanja (strugotina).

Najveći uspjeh u pripremi miješanog čeličnog otpada postignut je primjenom čekićastih lomilica (tzv. "šreder") gdje se otpadak lomi na male komadiće koji se kasnije magnetski separiraju [31]. Slikom 14 prikazan je shematski izgled "šreder" postrojenja.



Slika 14. Shematski prikaz "šreder" postrojenja [32]

Cijena čeličnog otpada ovisi o tržišnim potrebama za čelikom, te je on potrošna roba. Ako bi došlo do niže potražnje za čelikom, čelični otpad se treba kontinuirano skupljati iz ekoloških razloga i kako bi prerađivači otpada bili u funkciji. Čelični otpad je cijenom jako konkurentna primarna sirovina za proizvodnju čelika, te je njegova priprema radno i kapitalno intenzivna što se može vidjeti iz podataka navedenih u tablici 5.

Tablica 5. Kapitalni troškovi postrojenja za pripremu čeličnog otpada [23]

Postrojenje za pripremu	Troškovi, mil. \$
Preša	0,065 – 1,7
Škare	0,2 – 3,0
Čekičasta lomilica	1,0 – 3,0

4.2.3. Procjena nastajanja čeličnog otpada

Čelični otpad u nekoj državi ili regiji predstavlja sumu vlastitog, procesnog i starog otpada. Države nastoje bilancirati količinu otpada i proizvodnju čelika po pojedinim postupcima. Bilanciranje sadašnjeg i budućeg otpada započinje analizom čeličanskog sektora u prethodnim godinama. Čelični otpad se može bilancirati pomoću odgovarajućih koeficijenata nastajanja otpada te podataka o proizvodnji i potrošnji čelika. Ukupni godišnji prirast čeličnog otpada se tako može prikazati sljedećim izrazom [23]:

$$S_n = S_n^a + S_n^b + S_n^m \quad (1)$$

gdje su S_n^a , S_n^b , S_n^m - količine vlastitog, procesnog i starog otpada. Količina vlastitog otpada se prikazuje kao:

$$S_n^a = C_n' \frac{K^a}{100} \quad (2)$$

gdje je C_n' - prividna vlastita godišnja proizvodnja sirovog čelika (t), K^a - koeficijent nastajanja vlastitog otpada (%). Prividna domaća proizvodnja čelika predstavlja vlastitu proizvodnju sirovog čelika (C_n) korigiranu za bilancu izvoza i uvoza sirovog čelika (ΔC_n) odnosno:

$$C_n' = C_n \pm \Delta C_n \quad (3)$$

Godišnji porast nastanka procesnog čeličnog otpada iskazuje se sljedećom jednačinom:

$$S_n^b = P_n \frac{K^b}{100} \quad (4)$$

gdje je P_n – godišnja potrošnja čelika (t), K^b – koeficijent nastanka procesnog otpada. Ako nema podataka o stvarnoj godišnjoj potrošnji čelika može se izračunati prividna potrošnja čelika prema sljedećem izrazu:

$$P_n' = C_n + (E \pm \Delta P) \quad (5)$$

gdje je E – koeficijent za preradu sirovog čelika u čelične proizvode, ΔP – bilanca izvoza i uvoza poluproizvoda i gotovih čeličnih proizvoda. Godišnja količina nastalog starog čeličnog otpada pritom iznosi:

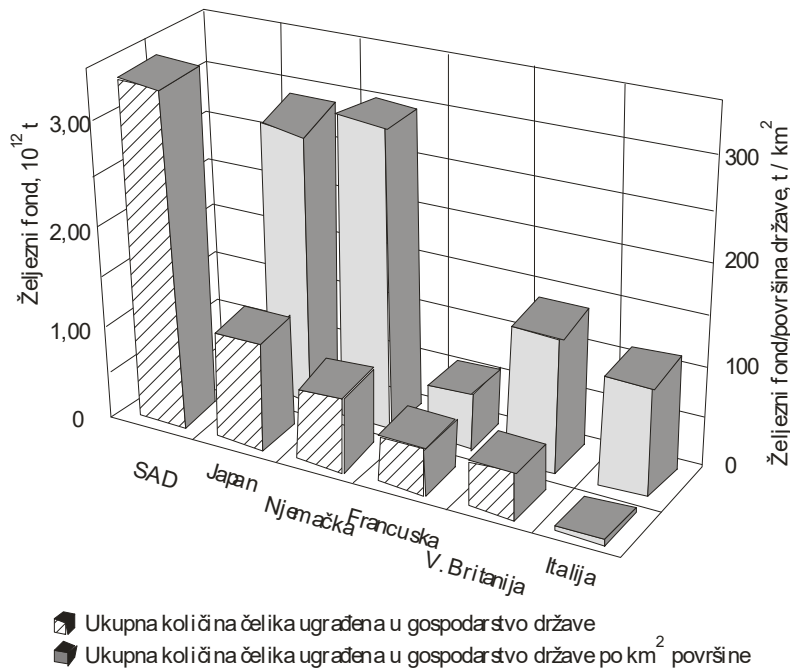
$$S_n^m = P_{(n-T_{av})} \frac{U_{avp}}{100} \quad (6)$$

gdje je T_{av} – prosječni vijek trajanja čeličnog proizvoda, a U_{avp} – koeficijent koji se može izračunati iz sljedećeg izraza:

$$U_{avp} = \frac{100 - \sum_{i=1}^5 l_i}{100} \times U_{av} \quad (7)$$

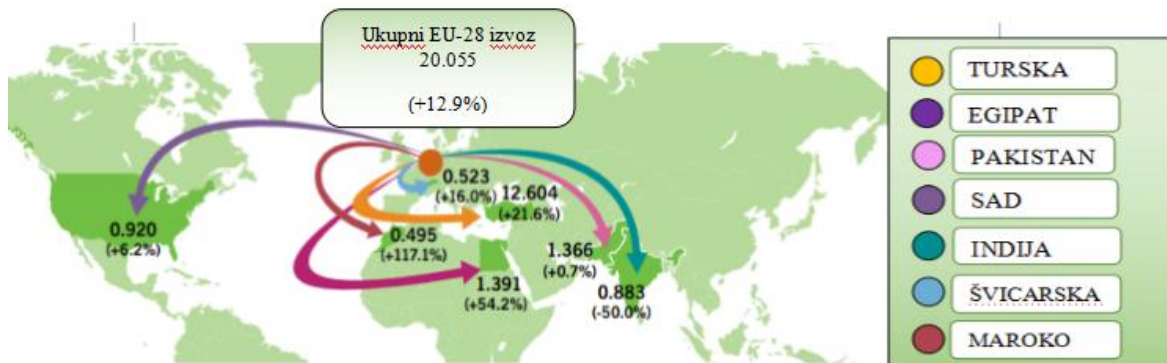
gdje je U_{av} – koeficijent prosječnog stupnja povratka čeličnih proizvoda (%), l_i – bespovratni gubici čelika (%).

Na slici 15 prikazan je histogram koji prikazuje procjenu željeznog fonda vodećih industrijskih država svijeta. Brzina skupljanja otpada znatno je veća u Njemačkoj i Japanu, nego u SAD i Francuskoj.



Slika 15. Željezni fond u glavnim industrijskim državama svijeta [29]

Godišnja brzina skupljanja čeličnog otpada je 2-3 % željeznog fonda i taj će se trend u budućnosti vjerojatno nastaviti [28]. Europska Unija (28) je još uvijek vodeći svjetski izvoznik čeličnog otpada. Izvoz se povećao za 12,9 % na 20,055 milijuna tona, a glavni kupac je Turska s +21,6 % do 12,604 milijuna tona. Zabilježen je pad izvoza iz EU u Indiju -50 % do 0,883 milijuna tona. Unutarnji izvoz željeznog otpada EU iznosio je ukupno 29,123 milijuna tona. Slikom 16 prikazani su glavni tokovi izvoza čeličnog otpada iz Europske Unije.



Slika 16. Glavni tokovi izvoza čeličnog otpada iz EU (28), (milijuna tona) [15]

4.3. Ostale sirovine

Legure željeza s elementima koji služe kao legirajući dodaci ili dezoksidanti pri izradi čelika nazivaju se ferolegure. Zbog niže cijene legirajući elementi se dodaju u obliku ferolegure. Tako se postiže veći stupanj asimilacije i ubrzano taljenje. Za proizvodnju ferolegura kao sirovina se koriste rude (Mn-ruda, Cr-ruda itd.), talitelji (vapnenac ili dolomitni vapnenac). Dobivaju se u elektrolučnim pećima sa zaštićenim

lukom, a kao reducens se koristi koks. Najveći trošak za proizvodnju ferolegura je električna energija. Sadržaj primjesa u ferolegurama je relativno nizak zbog kvalitetnih sirovina i pravilne rafinacije.

Ferolegure su se nekada koristile u komadastom obliku. U sustavima za automatsko ulaganje koriste se ferolegure u različitim granulacijama, a kasnije i u praškastom obliku (injektiranje). U zadnje vrijeme ferolegure se dodaju u obliku žice. Za razvoj novih vrsta čelika potrebne su i nove ferolegure. Pored uobičajenim (FeMn, FeCr, FeSi, FeMo, FeW, FeTi, FeNbTi, FeB) danas se koriste i ferolegure s magnezijem, cirkonijem, barijem itd. Od novih tehnologija postoji proizvodnja ferolegura u plazma pećima, prije svega za FeCrC ferolegure, jer se u njih može ulagati sitna ruda i sitni reducens (gotovo bez pripreme).

5. PRIMJENA ČELIČNOG OTPADA

Recikliranje čeličnog otpada najčešće se provodi upotrebom čeličnog otpada tijekom proizvodnje čelika u kisikovom konvertoru i elektrolučnoj peći. U proizvodnji čelika, izraz "primarna proizvodnja" općenito se odnosi na proizvodnju željeza iz željezne rude u visokoj peći, koja se nakon toga obrađuje u kisikovom konvertoru radi dobivanja čelika. "Sekundarna proizvodnja" je povezana s recikliranjem i to je obično postupak elektrolučne peći koja čelični otpad pretvara u novi čelik ponovnim taljenjem starog čelika. Međutim, primarna proizvodnja čelika nije karakteristična samo za Linz-Donawitz postupak, a tako ni sekundarna proizvodnja čelika nije karakteristična samo za elektrolučnu peć. Uobičajena je praksa da se 10% do 30% otpada koristi kao uložak za unos u Linz-Donawitz postupak [30]. Svjetska proizvodnja sirovog čelika u LD konvertoru i elektrolučnoj peći po regijama prikazana je u tablici 6.

Gledano prema kružnoj ekonomiji, ukoliko dođe do veće količine otpada, to bi moglo rezultirati povećanjem stope udjela čelika izrađenog elektrolučnim postupkom. Nastavljajući poboljšanja u postrojenjima za preradu otpada i segregaciju vrsta otpada poboljšat će se efikasnost u procesu proizvodnje čelika [33, 34].

Tablica 6. Svjetska proizvodnja sirovog čelika LD i elektrolučnim procesom (2017. godina) [15]

	Miliona tona		Postotak ukupne proizvodnje	
	LD PROCES	ELEKTROLUČNI PROCES	LD PROCES	ELEKTROLUČNI PROCES
EUROPSKA UNIJA (28)	100,6	67,5	59,8	40,1
OSTATAK EUROPE	13,8	28,5	32,6	67,5
ZND	68,4	27,2	66,9	26,7
SJEVERNA AMERIKA	37,8	78,0	32,6	67,4
JUŽNA AMERIKA	30,0	13,2	68,6	30,2
AFRIKA	4,3	10,0	30,0	70,0
BLISKI ISTOK	2,2	30,1	6,9	93,1
AZIJA	966,2	189,2	83,5	16,4
OCEANIJA	4,8	1,2	79,5	20,5
SVIJET	1228	445	73,0	26,5

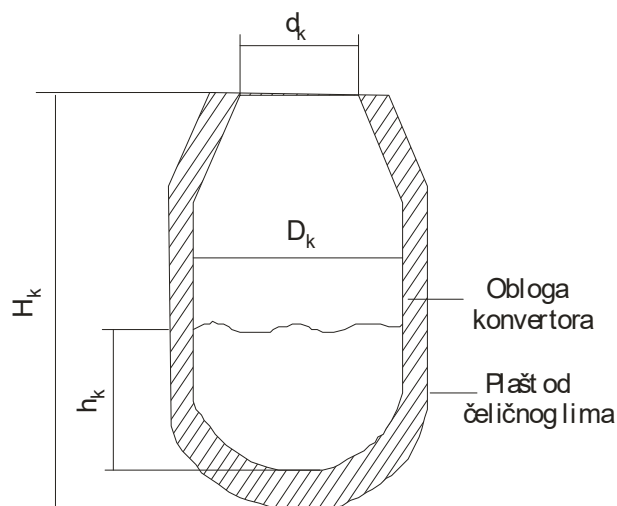
*ZND- Zajednica nezavisnih država bivšeg SSSR-a

5.1. Proces proizvodnje čelika u kisikovom konvertoru

Proizvodnja čelika u kisikovim konvertorima desetljećima je najvažniji postupak izrade čelika. U početku proizvodnje se pokušavalo propuhivanje taline kisikom odozdo, ali je došlo do brzog trošenja podnice pa se prešlo na uvođenje kisika odozgo pomoću koplja hlađenog vodom.

Proces izrade u kisikovom konvertoru bio je jeftiniji i efikasniji od ostalih te je brzo bio prihvaćen u cijelom svijetu. LD postupak je izuzetno fleksibilan s obzirom na sirovine. U samim počecima ovog procesa u masovne ugljične čelike prerađivalo se sirovo željezo niskog sadržaja fosfora (do 0,3- 0,4 mas. %).

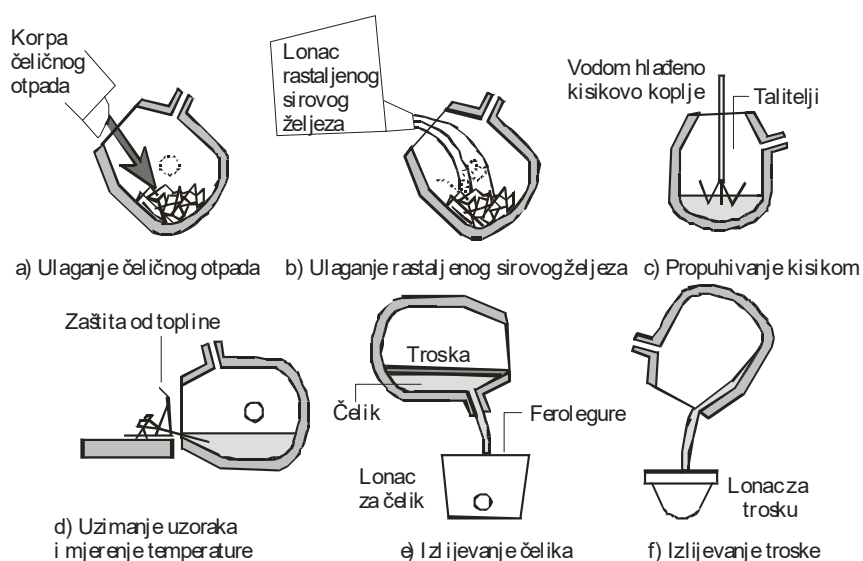
Konstrukcija kisikovitih konvertora je simetrična. Glavne karakteristike konvertora su visina (H_k) i promjer (D_k), dubina taline (h_k) i promjer grla (d_k). Shematski prikaz osnovnog izgleda konvertora može se vidjeti na slici 17.



Slika 17. Shematski prikaz osnovne konstrukcije kisikovog konvertora [6]

Nakon II. svjetskog rata porasla je proizvodnja i potrošnja čelika u svijetu. Izgradili su se LD konvertori kapaciteta od 50 do 500 t, a LD-AC kapaciteta do 200 t. Čeličane instaliraju najmanje dva, često i tri konvertora (dok je jedan u remontu, preostala dva normalno rade). S ovakvim načinom rada proizvodnja se dvostruko povećava.

Cilj proizvodnje čelika u kisikovim konvertorima je smanjivanje sadržaja ugljika u rastaljenom sirovom željezu, smanjivanje i/ili kontrola sadržaja fosfora i sumpora, te povećanje temperature rastaljenog čelika na oko 1635°C. Proces proizvodnje čelika u konvertoru se odvija u nekoliko proizvodnih faza koje traju oko 45 minuta. Postoje tri inačice uvođenja kisika u rastaljenu talinu, odnosno tri vrste kisikovih konvertora: propuhivanje kisikom odozgo, odozdo i kombinirano. Sve faze proizvodnji čelika u kisikovom konvertoru (od ulaganja čeličnog otpada do izlivanja troske) prikazane su na slici 18.

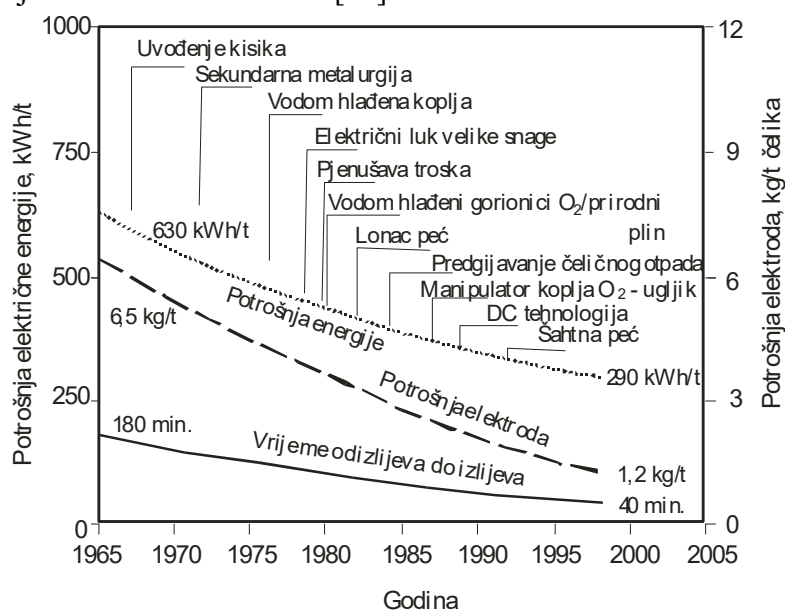


Slika 18. Shematski prikaz faza proizvodnje čelika u kisikovom konvertoru [35]

5.2. Proces proizvodnje čelika u elektrolučnim pećima

Elektrolučna peć je prvi put puštena u rad 1906. godine u Njemačkoj, a već 1917. godine u svijetu je radilo preko 700 elektrolučnih peći [35]. Prvih 50-60 godina elektrolučni postupak je služio isključivo za proizvodnju plemenitih čelika. U posljednjih 40-ak godina proizvodnja elektročelika u svijetu znatno je porasla. Elektročelik se u početku koristio primarno za izradu dugih proizvoda (žica, nosači, cijevi), ali je proizvodni asortiman danas proširen i na neke plosnate proizvode (lim, traka) uglavnom iz legiranih čelika [36].

Porast produktivnosti elektrolučne peći posljedica je uporabe gorionika kisik/gorivo, kisikovog koplja, injektiranja ugljika i vapna, rada s pjenušavom troskom, naknadnog izgaranja CO u slobodnom prostoru peći, miješanja taline, DC-pećne tehnologije, predgrijavanja čeličnog otpada, kontinuiranog punjenja. Tehnološki razvoj proizvodnje elektročelika od druge polovice 20. st. do početka 21. st. prikazan je slikom 19. Jedna od najvažnijih karakteristika je vrijeme od izljeva do izljeva koje je značajno smanjeno s 180 na 40 minuta [37].

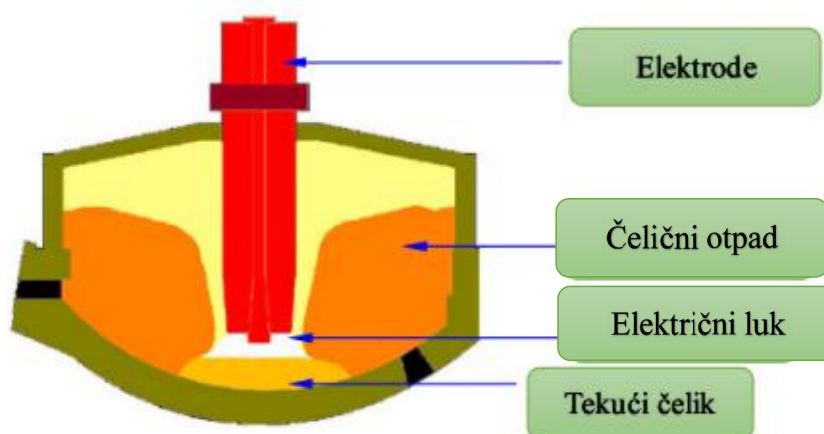


Slika 19. Tehnološki razvoj proizvodnje elektročelika [4]

Čelični otpad je osnovna sirovina za proizvodnju čelika u elektrolučnoj peći. Njegova dostupnost i kvaliteta ovisi o regiji, a alternativni izvori željeza doprinose njegovoj stabilnosti na tržištu. Dio metalnih primjesa se tijekom izrade elektročelika ne može odstraniti te može ograničavati proizvodni program rada elektrolučne peći. Osim čeličnog otpada kao uložak u određenom udjelu se može koristiti rastaljeno sirovo željezo, proizvodi direktne redukcije i sirovog željeza kao produkt redukcijskog taljenja Corex postupkom. Zbog nižeg sadržaja oligoelemenata dobiva se čelik veće čistoće.

Presudnu ulogu u proizvodnji čelika ima ugljik, jer utječe na toplinsku bilancu procesa. U elektrolučnu peć se radi naugličjenja dodaje određena količina ugljika da bi se reakcija nastanka mješavice CO mogla nesmetano odvijati. Prilikom ulaganja ili izravnim injektiranjem u peć dodaje se talitelj, najčešće vapno. Za oksidaciju se isključivo koristi tehnički kisik, a nekada se koristila Fe-ruda. Posljednji godina se radi s tzv. pjenušavom troskom. Pokrivanjem električnog luka slojem troske energija se prenosi na talinu i unutarnji zidovi peći štite se od zračenja.

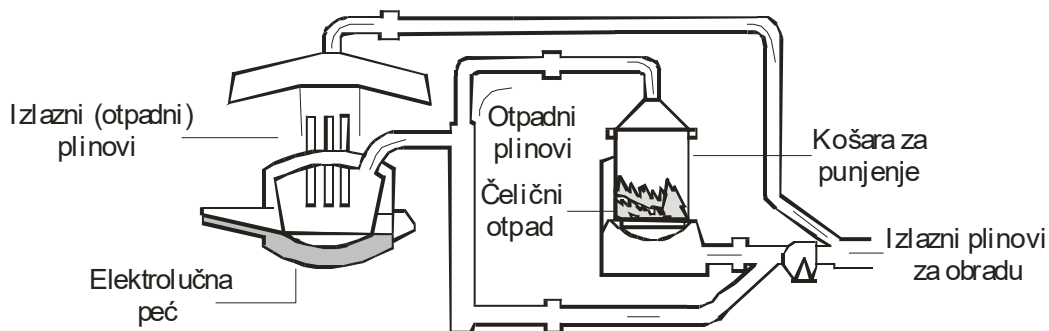
Svi dosadašnji postupci imaju u većoj ili manjoj mjeri određene prednosti te su proizvođači čelika svjesni da nema idealnog rješenja koje bi zadovoljilo sve proizvodne faze tijekom izrade čelika. Nastoji se osigurati fleksibilnost postupka, povećati produktivnost, poboljšati kvaliteta čelika uz uvažavanje ekoloških kriterija. U budućnosti će se u većoj mjeri reciklirati elektropećna prašina i valjaonička ogorina u agregatima za izradu čelika (preliminarno se pokazalo da je taj materijal dobro sredstvo za pjenjenje troske). Elektrolučne peći na istosmjernu struju će se i nadalje razvijati (zbog visoke efikasnosti tijekom taljenja) jer primjena jedne grafitne elektrode kroz svod peći osigurava veći stupanj automatizacije procesa. Na slici 20 shematski je prikazana elektrolučna peć na izmjeničnu struju.



Slika 20. Shematski prikaz elektrolučne peći [38]

5.3. Novi postupci

Razvojem novih tehnologija razvijeni su i novi postupci pripreme i pretaljivanja čeličnog otpada. Čelični otpad se najprije predgrijavao u posebnim košarama koje su bile smještene izvan sustava elektrolučne peći, slika 21. Iako je takvo predgrijavanje imalo niz nedostataka (npr. gubitak otpadnog plina između peći i košare, nekontrolirana regulacija, velika emisija u okoliš) prednost je bila što je potrošnja električne energije smanjena za 20-30 kWh/t čelika. Kasnije, 1960. god. je predgrijavanje čeličnog otpada prirodnim plinom obuhvaćalo grijanje košara za čelični otpad gorionicima postavljenim u svodu elektrolučne peći. Međutim, takva primjena prirodnog plina imala je negativan ekološki utjecaj jer raspad ugljikovodika povećava emisiju.



Slika 21. Shematski prikaz predgrijavanja čeličnog otpada u košari za čelični otpad [22]

Energetski optimalna peć tzv. EOF (engl. Energy Optimizing Furnace) je agregat za izradu čelika kisikom velikog stupnja naknadnog sagorijevanja. Kod tog postupka se predgrijavanje čeličnog otpada provodi u nizu komora na temperaturama 800-1200°C. Peć uglavnom koristi uložak sa 40-60 % čeličnog otpada, a ostatak je "vrući metal" (sirovo željezo). Energetski optimalne peći su instalirane u Brazilu, Indiji i Italiji te koriste do 60 % čeličnog otpada.

K-ES postupak (njem. Kombiniertes Elektrostahlerzeugungssystem) je proizvodni proces čelika u modificiranoj izvedbi elektrolučne peći koji je razvijen u Japanu 1986. god. Kod takvog načina rada su primijenjeni osnovni principi kombiniranog propuhivanja kisikovih konvertora. Postupak je 1986. godine razvijen u Japanu na elektrolučnoj peći kapaciteta 30 t. Primarni izvor energije kod ovog postupka je praškasti ili komadasti ugljen i kisik koji se dodaju se talinu. Ugljen izgori u plinoviti CO koji u slobodnom pećnom prostoru naknadno sagorijeva u CO₂. Injektiranjem sitnog ugljena i plinova (argon, dušik, propan) odozdo kroz postavljene mlaznice postiže se znatno bolje miješanje.

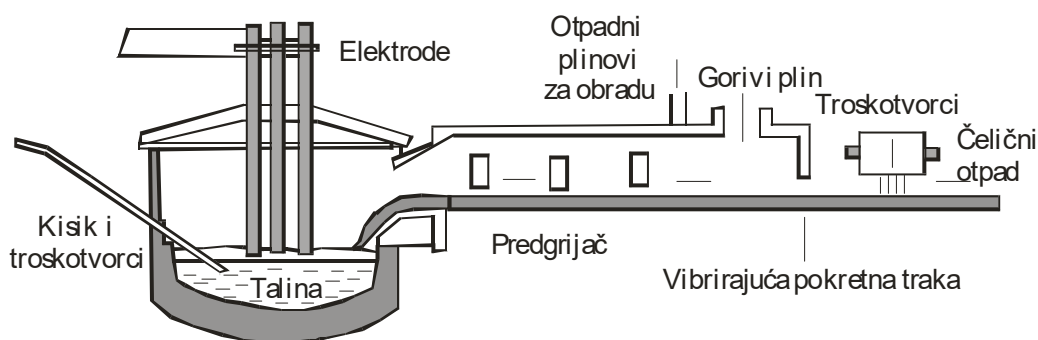
Efikasnije iskorištenje električne energije i energije iz ostalih izvora koristi se kod Danarc postupka. Danarc postupak predstavlja kombinaciju primjene visoke tehnologije uz veliko iskorištenje kemijske energije te se kod njega u peć injektiraju ugljen i kisik.

Radi smanjenja ulazne energije za rad elektrolučne peći razvijene su šahtne peći s jednom ili dvije peći. Predgrijavanje čeličnog otpada se u takvom slučaju provodi otpadnim dimnim plinovima a peći mogu raditi kao AC ili DC peći. U takvoj kombinaciji čelični otpad je složen u koloni, predgrijava se i tijekom taljenja kontinuirano puni peć.

Proizvodnja čelika u tandem elektrolučnoj peći (AC i DC varijante) slična je konvencionalnoj tehnologiji predgrijavanja čeličnog otpada, samo što se ovdje

umjesto predgrijavanja košare čeličnog otpada predgrijavanje provodi u posebnoj peći. Sustav tandem peći se sastoji od dviju identičnih peći sa zajedničkim držačima elektroda, sustavom za podizanje i napajanje električnom energijom. Ciklus rada peći obuhvaća predgrijavanje čeličnog otpada i taljenje tj. čeličnim otpadom napuni se do 60% prva peć u kojoj se provodi predgrijavanje otpadnim plinovima iz druge peći. Nakon provedenog predgrijavanja dodaje se preostali čelični otpad i započinje taljenje, a za to vrijeme druga peć počinje s punjenjem čeličnog otpada za predgrijavanje.

Consteel postupak je novorazvijeni postupak koji se sastoji od kontinuiranog punjenja čeličnim otpadom i troskotvorcima. Najbolji rezultati postižu se taljenjem laganog čeličnog otpada ali se mogu koristiti i produkti direktne redukcije te 30-40 % vrućeg metala. Čelični otpad se u dugom tunelu predgrijava toplinom otpadnih plinova peći, pri čemu je strujanje plina suprotno tijeku čeličnog otpada i zatim transportira tunelom na traci i kontinuirano puni elektrolučna peć, slika 22.



Slika 22. Shematski prikaz najbitnijih komponenti Consteel postupka [22]

Peći skraćeno naziva IHI (engl. Ishikawajima-Harima Heavy Industry) su nova generacija šahtnih peći koja je puštena u rad 1996. godine. Kod njih se sustav za punjenje peći sastoji se od komore za predgrijavanje i opreme za ulaganje pri čemu se čelični otpad spušta iz gornjeg dijela komore. Pri tom otpadni plin struji kroz komoru i predgrijava otpad. Temperatura predgrijavanja čeličnog otpada je do 800°C a izlazna temperatura plina iz komore je 200°C. Predgrijani čelični otpad kontinuirano se dodaje u prostor između dviju grafitnih elektroda DC-peći s dvije podne elektrode.

Da bi se umanjili nedostaci elektrolučne peći, poput neodgovarajućeg iskorištenja topline otpadnih plinova i slobodne emisije prašine s dimnim plinovima tijekom punjenja peći razvijena je tzv. Comelt peć. Comelt peć se sastoji od četiri pod kutem postavljene pokretne grafitne elektrode, a protuelektroda je ugrađena u središnji dio podnice DC-peći.

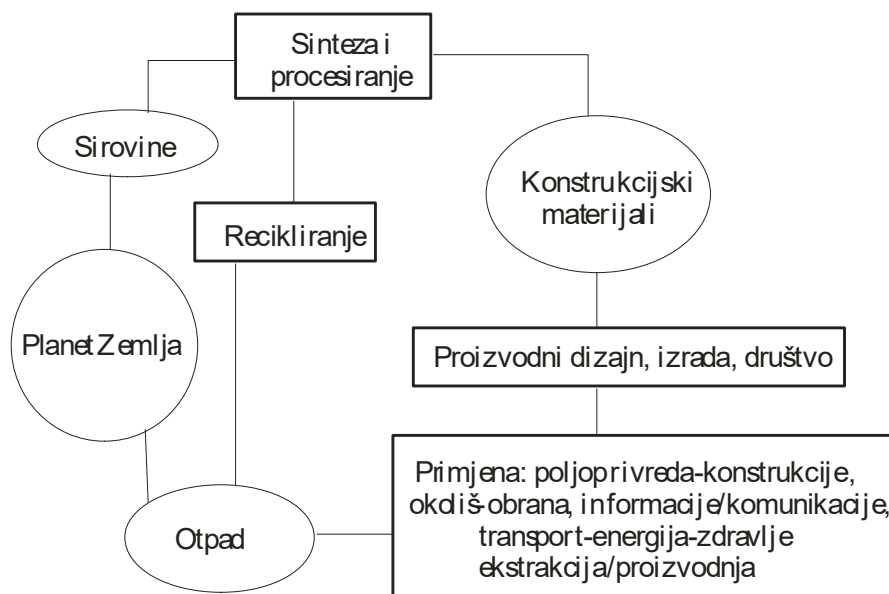
Conarc postupak (engl. Converter Arc Furnace) je razvijen u Njemačkoj i predstavlja kombinaciju rada kisikovog konvertora i elektrolučne peći pri čemu mu je osnovna prednost provođenje oksidacije ugljika u jednoj, a taljenja u drugoj peći.

Contiarc postupak je također razvijen u Njemačkoj, a osnovna karakteristika mu je da se provodi u fiksnoj prstenastoj šahtnoj peći s centralno postavljenim sustavom za grijanje s DC-lukom. Tijekom rada peć se kontinuirano puni čeličnim otpadom koji se predgrijava otpadnim plinovima, a razina spuštanja čeličnog otpada se kontrolira odgovarajućim mjernim sustavom.

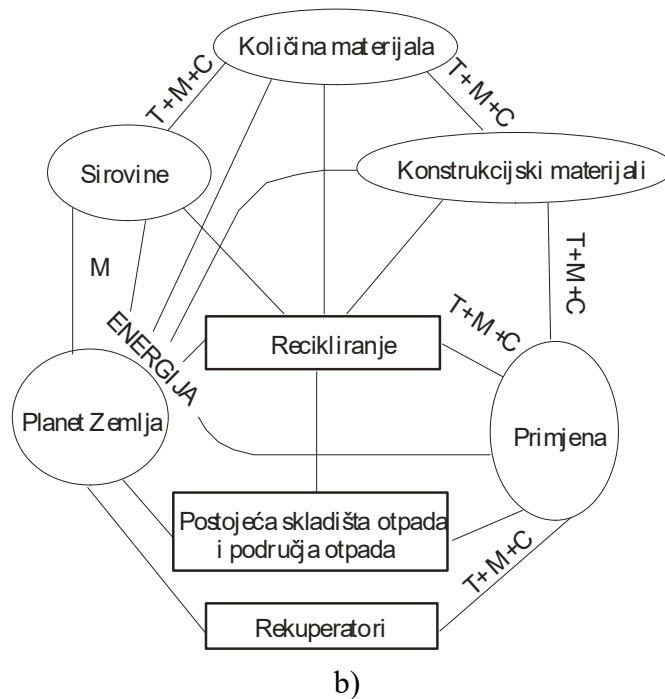
5.4. “Zeleni” materijal čelik

Kod modernih postupaka proizvodnje čelika je najvažnije istaknuti da je čelik “zeleni” materijal, jer se čelik od svih materijala najviše reciklira [39]. Industrijski sustavi s klasičnim tijekom materijala korišteni početkom 1970-ih godina prikazani su na slici 23a. Današnji industrijski sustavi prikazani slikom 23b su potpuno drugačiji, jer recikliranje u ciklusu materijala zauzima središnje mjesto, uz maksimalno iskorištenje postojećeg otpada.

Recikliranje čelika je prihvatljivo za okoliš. Godišnji stupanj recikliranja čelika u svijetu iznosi oko 45 %. U SAD-u je čelik najrecikliraniji materijal, gdje kisikovi konvertori troše 20-30 % čeličnog otpada, a elektrolučne peći rade i sa 100 % čeličnog otpada. Velika Britanija je odlični pokazatelj recikliranja čelika, gdje se svake godine od automobila reciklira oko 2Mt čeličnog otpada.



a)



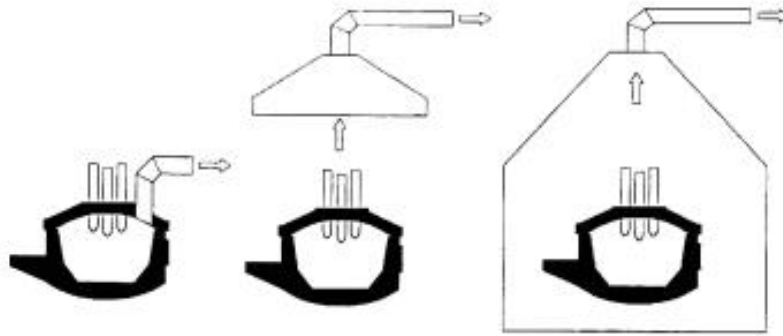
Slika 23. a) Shematski prikaz globalnog ciklusa materijala početkom 1970-ih godina [39]
 b) Shematski prikaz današnjeg globalnog ciklusa materijala
 $T + M + C = \text{tehnologija} + \text{materijali} + \text{cijena}$ [39]

Održiva proizvodnja čelika uključuje čimbenike kao što su proizvodnja korištenjem manje energije i materijala, stvaranje manje otpada, korištenjem manje opasnih materijala, izrada proizvoda sa “zelenijim” svojstvima kao što su reciklabilnost i manja potrošnja energije [40].

5.5. Prašina i emisije tijekom procesa recikliranja čelika

Tijekom recikliranja stvara se prašina u električnom luku peći i odvodi se s otpadnim plinovima koji sadrže uglavnom željezo, ali i vrijedne obojene metale kao što su cink ili olovo. Dakle, ne samo ekološka razmatranja, već također održive ekonomije zahtijevaju skupljanje otpadnih plinova i njihovo uklanjanje. Postoje tri glavne vrste sakupljanja otpadnih plinova, a to su odsis preko otvora na svodu peći, pokretni nadsvodni odsis i zatvoreni sustav odsisa [41]. Shematski prikaz sustava za sakupljanje prašine i emisija može se vidjeti na slici 24.

Prašina iz peći može se sakupljati kroz četvrtasti otvor na vrhu peći. Otvor skuplja samo prašinu iz postupka recikliranja. Kompletno kućište peći na taj način poboljšava skupljanje gotovo sve prašine i sprječava bilo koji njen izlazak van u okoliš. Dodatna korist takve konstrukcije je što štiti protiv emisije buke. Samim time predstavlja značajan izvor brige za okoliš pri proizvodnji čelika [42].



Slika 24. Sustavi sakupljanja prašine i emisija [43]

6. ZAKLJUČAK

Nakon detaljnog pregleda dostupne literature iz područja primjene čeličnog otpada kao sekundarne sirovine za proizvodnju čelika može se zaključiti sljedeće.

- Čelik se najviše koristi od svih metalnih materijala zbog svojih dobrih svojstva kao što su čvrstoća, žilavost, rastezljivost, spojivost, mogućnost oblikovanja deformiranjem, mogućnost promjene sastava legiranjem, toplinskom obradom itd.
- Sirovine za proizvodnju čelika mogu biti primarne (sirovo željezo, direktno reducirano željezo) i sekundarne (čelični otpad).
- Čelični otpad se može podijeliti na odgovarajuće klase, obično prema podrijetlu i po kvaliteti. Prema podrijetlu čelični otpad može biti vlastiti, procesni i stari ili amortizirani otpad.
- Za što kvalitetniju proizvodnju čelika uveden je sustav gospodarenja čeličnim otpadom tj. europski sustav klasifikacije čeličnog otpada koji predstavlja standard za definiranje kvalitete čeličnog otpada.
- Prije primjene čeličnog otpada kao sekundarne sirovine potrebno je provesti njegovu pripremu (npr. uklanjanje štetnih primjesa – posebno bakra, rezanje, lomljenje, magnetska separacija, predgrijavanje i sl.).
- Proizvodnja čelika u kisikovim konvertorima desetljećima je najvažniji postupak izrade čelika koji kao sekundarnu sirovinu koristi čelični otpad te se općenito sastoji od sljedećih faza: ulaganje čeličnog otpada, ulaganje rastaljenog sirovog željeza, propuhivanje kisikom, uzimanje uzoraka i mjerenje temperature, izlivanje čelika izlivanje troske.
- Pri elektrolučnom postupku proizvodnje čelika čelični otpad predstavlja osnovnu sirovinu (konvertori primarno koriste sirovo željezo, a malo čeličnog otpada, dok je kod elektrolučnih peći obrnuto).
- Novi postupci pretaljivanja čeličnog otpada obuhvaćaju razvoj energetske optimalnih peći (tzv. EOF peći), K-ES postupka, Danarc postupka, šahtnih i tandem peći itd.
- Razvijeni su i novi postupci proizvodnje čelika s kontinuiranim punjenjem poput Consteel, IHI, Comelt, Conarc i Contiarc postupaka.
- Sve veća pažnja se posvećuje i zaštiti okoliša tj. razvoju različitih sustava za skupljanje emisije iz procesa proizvodnje čelika.

7. LITERATURA

1. M. P. Luxan, R. Sotolongo, F. Dorrego, E. Herrero, Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace, *Cement and Concrete Research* **30** (2000) 517 - 519.
2. L. Ugrin, Dobivanje, svojstva i upotreba čelika, Završni rad, Sveučilište u Splitu, Split, 2016.
3. Čelik, dostupno na:
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=13250> (11.12.2019.)
4. M. Gojić, J. Črnko, S. Kožuh, Proizvodnja čelika u dvadesetom stoljeću, *Kemija u industriji* **51** (2002) 7/8, 317 - 328.
5. P. Pavlović, Materijal čelik, SKTH/Kemija u industriji, Zagreb, 1990.
6. V. Kudrin, *Steelmaking*, Mir Publishers, Moscow, 1985.
7. K. Vollrath, Symposium über Anwendungen der Vakuummateriellurgie, *Stahl und Eisen* **119** (1999) 12, 93 - 95.
8. G. Stolte, *Secondary Metallurgy*, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2002.
9. R. J. Fruehan, *Steelmaking and Refining Volume*, AISE Steel Foundation, Pittsburgh, 1998.
10. *Steel Statistical Yearbook 2019*, <http://www.worldsteel.org>
11. *Steel Manual*, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2003.
12. H. Kreulitsch, W. Egger, H. Wiesinger, A. Eberle, Iron and Steelmaking of the Future, *Steel Times* **221** (1993) 5, 217 - 220.
13. J. Krajcar, Budućnost proizvodnje sirovog čelika u Sisku, *Metalurgija* **31** (1992) 4, 135 - 138.
14. P. Heinrich, W. Henning, G. Knepe, J. I. Larretxi, Produktivität, Qualität und Ressourcenschonung bei der CSP - Technologie, *Stahl und Eisen* **123** (2003) 3, 47 - 53.
15. https://www.bdsv.org/fileadmin/user_upload/180222-Ferrous-report-2017-V07.pdf (20.5.2020.)
16. <http://gd.mvep.hr/hr/vijesti/srbija-svjetski-lider-po-rastu-proizvodnje-celika-u-2018,55211.html> (19.5.2020.)
17. J. K. Stone, The Origin or Modern Oxygen Steelmaking, *Steel Times* **228** (2000) 9, 328 - 330.
18. F. Wallner, E. Fritz, Fifty Years of Oxygen Converter Steelmaking, *MPT International* **25** (2002) 3, 38 - 43.
19. W. T. Hogan, *Steel in the 21st Century*, Lexington Books, An Imprint of Macmillan, Inc., New York, 1994.
20. F. -J. Floßdorf, Begriffsbestimmungen für die Einteilung der Stähle besonders der nichtrostenden Stähle, *Stahl und Eisen* **121** (2001) 4, 105 - 107.
21. S. Kožuh, *Specijalni čelici*, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
22. M. Gojić, *Metalurgija čelika*, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet Sisak, 2006.
23. A. Čavić, Z. Gulišija, Lj. Nedeljković, I. Ilić, Đ. Simović, Ž. Jeftić, *Čelični otpadak*, PŠ Megatrend, Beograd, 1998.
24. S. Aydin, Y. Taptik, C. Arslan, Scrap, Recycling and Steel Production, *Ironmaking and Steelmaking* **23** (1996) 3, 242 - 246.
25. D. Ameling, Recycling of Steel - a Successful Way to Benefit Resources and Environment, *Stahl und Eisen* **120** (2000) 7, 53 - 57.

26. E. Sandberg, B. Lennox, P. Undvall, Scrap management by statistical evaluation of EAF process data, *Control Engineering Practice* **15** (2007) 1063–1075.
27. W. M. Heenan, Steel the Most Recycling Material in America, *Steel Times* **221** (1993) 515.
28. J. Krajcar, Staro željezo kao sirovina za proizvodnju čelika u elektrolučnim pećima, *Metalurgija* **32** (1993) 3, 97 - 100.
29. J. - P. Birat, Scrap as a Sustainable Resource of Iron Units for the Future, *Stahl und Eisen* **123** (2003) 5, 51 - 57.
30. L. Savov, E. Volkova, D. Janke, Copper and Tin Steel Scrap Recycling, *RMZ - Materials and Geoenvironment* **50** (2003) 3, 627 - 640.
31. L. Aboussouan, Ph. Russo, M.N. Pons, D. Thomas, J.P. Birat, D. Leclerc, Steel scrap fragmentation by shredders, *Powder Technology* **105** (1999) 288–294.
32. I. Ilić, S. Stepić, Dobivanje metala iz amortizovanog i proizvodnog otpada, *Rudarstvo, Geologija i Metalurgija* **52** (2001) 4/5, 15 - 22.
33. <file:///E:/Recikliranje%20%C4%8Delika-literatura-10-1-2020/81048181.pdf> (3.5.2020.)
34. K. Yue, Comparative analysis of scrap car recycling management policies, *Procedia Environmental Sciences* **16** (2012) 44 – 50.
35. E. T. Turkdogan, *Fundamentals of Steelmaking*, Institute of Materials, London, 1996.
36. J. Krajcar, Proizvodnja čelika u elektrolučnoj peći - stanje i perspektive, *Metalurgija* **35** (1996) 2, 99 - 102.
37. Y. Zhang, P. V. Barr, T. R. Meadowcroft, Continuous scrap melting in a short rotary furnace, *Minerals Engineering* **21** (2008) 178–189.
38. D. Guo, G. A. Irons, Modelling of steel scrap movement, *Applied Mathematical Modelling* **32** (2008) 2041–2049.
39. J. Szekely, *Steelmaking and Industrial Ecology - Is Steel a Green Material?*, *ISIJ International* **36** (1996) 1, 121 - 132.
40. D. A. I. Varvara, M. Tintelecana, C. Aciua, I. M. S. Boca, A. Hădărean, T. Rusa, R. Marea, An Assessment of the Substance Losses from Charge Composition Used to the Steelmaking – Key Factor for Sustainable Steel Manufacturing, *Procedia Manufacturing* **32** (2019) 15–21.
41. D. Janke, L. Savov, H.- J. Weddige, E. Schulz, Scrap - Based Steel Production and Recycling of Steel, *Materijali in Tehnologije* **34** (2000) 6, 387 - 399
42. F. Legarda, M. Herranz, Measurement of ¹³⁷Cs in dust from steel scrap smelting, *Applied Radiation and Isotopes* **53** (2000) 39 - 44.
43. https://www.wrforum.org/wp-content/uploads/2015/03/Metal-Recycling-Opportunities-Limits-Infrastructure-2013Metal_recycling.pdf (3.5.2020.)

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI:

Ime i prezime: Marija Rajković
Datum i mjesto rođenja: 09. rujan 1997., Sisak
Adresa: Kutinska cesta 106, 44202 Topolovac
Telefon: 095/829 9128
E-mail: marija.rajkovic09@gmail.com

OBRAZOVANJE:

2004.–2012. Osnovna škola „Budaševo - Topolovac - Gušće“ Sisak
2012.–2016. Tehnička škola Sisak, ekološki tehničar
2016.–2020. Metalurški fakultet Sisak, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija,
smjer Industrijska ekologija

OSOBNJE VJEŠTINE:

Poznavanje i vladanje radom na računalu
Strani jezik: Engleski
Vozački ispit – B kategorija