

# Oporaba topline od čeličanskih troski

---

**Marić, Toni**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*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:115:847154>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-18**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Toni Marić

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Toni Marić

## OPORABA TOPLINE OD ČELIČANSKIH TROSKI

### ZAVRŠNI RAD

Voditelj: Izv. prof. dr. sc. Ivan Brnardić  
Stručni voditelj: Igor Jajčinović, mag.ing.oecoing.

Članovi ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Tamara Holjevac Grgurić – predsjednica  
Izv. prof. dr. sc. Ivan Brnardić – član  
Izv. prof. dr. sc. Stjepan Kožuh – član  
Prof. dr. sc. Ankica Rađenović – zamjenski član

Sisak, rujan 2018.

*Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Ivanu Brnardiću na velikoj pomoći i savjetima tijekom izrade rada. Također, zahvaljujem se stručnom voditelju. Igoru Jajčinoviću mag.ing.oecoing na svim korisnim savjetima koji su doprinjeli pri izradi ovog rada. Hvala mojoj obitelji i prijateljima koji su uvijek bili uz mene tijekom studiranja.*

## SAŽETAK

Danas se čelik najčešće dobiva elektrolučnim postupkom i putem kisikovih konvertera gdje kao nusproizvod nastaje troska. Troska nastaje tijekom taljenja metala te zbog manje gustoće od rastaljenog metala, pliva na površini te zaštićuje rastaljeni metal od oksidacije. Prosječno po toni čelika nastaje 100 kg troske s temperaturom od oko 1650 °C te uzevši u obzir da se godišnje proizvodi 1.500 milijuna tona čelika u svijetu danas se sve više istražuju načini iskorištenja topline troske.

Prijašnjih godina, troska se odlagala na tlo ili jame gdje se hladila i skrućivala bez pokušaja da se iskoristi njezina toplina. U ovom radu opisan je proces proizvodnje čelika elektrolučnim postupkom i putem kisikovih konvertera te je dan pregled mogućih postupaka oporabe topline od nastale troske. Do današnjeg dana razvijeno je nekoliko različitih tipova uređaja za iskorištavanje topline koji se temelje na uporabi topline granuliranjem te kemijsko faznim promjenama.

**Ključne riječi:** proizvodnja čelika, troska, uporaba topline

## **Heat recovery from steel slags**

### **ABSTRACT**

Today, steel is most often produced by electric arc furnace process and through oxygen converters, where slag is one of the major byproduct. The slag is a formed during the melting of metals and because of its less dense than of molten metal, it floats on the surface and protects the molten metal from oxidation. An average of 100 kg of slags per ton of steel with a temperature of around 1650 ° C is generated, and considering that 1.500 million tons of steel is products annually in the world, today more and more ways of using heat from the slag are explored.

In recent years, the slag was landed on the ground or pit where it was cooled and solidified without trying to reuse its heat. In this paper the process of steel production by electric arc furnace process and through oxygen converters, as well as possible heat recovery processes from the high temperature slag were described. To date, several different heat recovery method have been developed, which are divided into heat recovery processes by granulation and based on chemical phase transformations.

**Key words:** steel production, slag, heat recovery

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. TROSKA.....	2
2.1. Vrste troske.....	2
3. PROIZVODNJA ČELIKA.....	3
3.1. Proizvodnja čelika elektropečnim postupkom.....	3
3.1.1. Elektrolučna peć.....	5
3.1.2. Lonac-peć.....	7
3.1.3. Troska iz elektropečnog postupka .....	7
3.2. Proizvodnja čelika putem kisikovog konvertora .....	9
3.2.1. Kisikov konvertor .....	10
3.2.2. Troska iz kisikovog konvertora.....	12
4. OPORABA TOPLINE TROSKE.....	13
4.1. Postupci uporabe topline granuliranjem .....	14
4.1.1. Granuliranje zračnim propuhivanjem .....	14
4.1.2. Atomizacija rotirajućom „šalicom“ .....	14
4.1.3. Atomizacija s rotirajućim diskom.....	15
4.1.4. Granulator s fluidiziranim slojem .....	16
4.2. Kemijska ili fazno promjenljiva metoda za uporabu topline.....	16
4.2.1. Reformiranje metana.....	17
4.2.2. Plinifikacija ugljena .....	17
5. UPORABA TROSKE NAKON OPORABE TOPLINE .....	19
6. ZAKLJUČAK .....	20
7. LITERATURA.....	21

# 1. UVOD

Danas u svijetu je čelik jedan od najvažnijih i najkorištenijih materijala primjenjuje se u svim industrijskim granama i u svakodnevnom životu. Ima veliku gospodarsku važnost te se unaprjeđenjem tehnika proizvodnje pokušava dobiti što kvalitetniji čelik uz manji utrošak energije. U današnje vrijeme se u svijetu proizvede preko 1,6 milijardi tona čelika godišnje. Proizvodnja čelika se vrši na dva osnovna načina: putem kisikovog konvertora gdje se kao glavna sirovina koristi sirovo željezo te elektrolučnim postupkom koji koristi čelični otpad kao primarnu sirovinu [1].

Pri proizvodnji čelika nastaju proizvodni ostaci, a kao najvažniji proizvodni ostatak izdvaja se troska koja nastaje tijekom taljenja metala. Njezina uloga je da štiti rastaljeni metal od raznih nečistoća i od oksidacije. Količina troske nastale u elektropečnom procesu kreće se u od 60 do 270 kg po toni elektročelika, dok kod proizvodnje čelika putem kisikovog konvertora od 85 do 165 kg po toni čelika. Prema fizikalno kemijskim svojstvima, troska se svrstava u neopasni otpad te se može odlagati na za to predviđena mjesta, međutim zbog svojih korisnih svojstava ona se može koristiti u razne svrhe. Troska se do sada odvozila na odlagališta gdje se hladila te zatim upotrebljavala u cestogradnji, proizvodnji cementa, betona itd. S obzirom da troska koja se odlaže doseže temperaturu od oko 1500 °C, odlaganjem troske na odlagališta (tlo, jame) dolazi do nepovratnog gubitka topline. Naime, procjenjuje se da je više od 40% energije iskorištene za taljenje sadržano u troski. Kako bi se smanjili troškovi proizvodnje čelika došlo se do ideje da se ta toplina od troske oporabi, što je i u skladu s jednim od glavnih ciljeva industrije za povećanjem energetske učinkovitost proizvodnih procesa te s načelima društveno odgovornog poslovanja. Poznato je da uporaba topline troske nije jednostavan proces s obzirom da prilikom uklanjanja njezine topline dolazi do promjene agregatnog stanja i to iz tekućeg u kruto stanje koje usporava daljnje odnošenje topline troske.

U ovom radu dani su podatci o količinama proizvedenog čelika u zadnjih 10 godina te su opisani postupci procesa proizvodnje čelika elektrolučnim postupkom i putem kisikovih konvertera. Nadalje, opisano je nekoliko različitih postupaka za uporabu topline od nastale troske koji se temelje na uporabi topline granuliranjem te kemijsko faznim promjenama, a neke od njih su: granuliranje zračnim propuhivanjem, atomizacija rotirajućom „šalicom“, atomizacija s rotirajućim diskom, granulator s fluidiziranim slojem, reformiranje metana i plinifikacija ugljena. Dobivena toplina se koristi za proizvodnju pare ili vruće vode koja se dalje može koristiti u proizvodnji električne energije ili u drugim industrijskim procesima. Navedenim postupcima osim topline dobivaju se i granule koje su slične riječnom pijesku te se kao takve mogu dalje koristiti u građevini i sl.

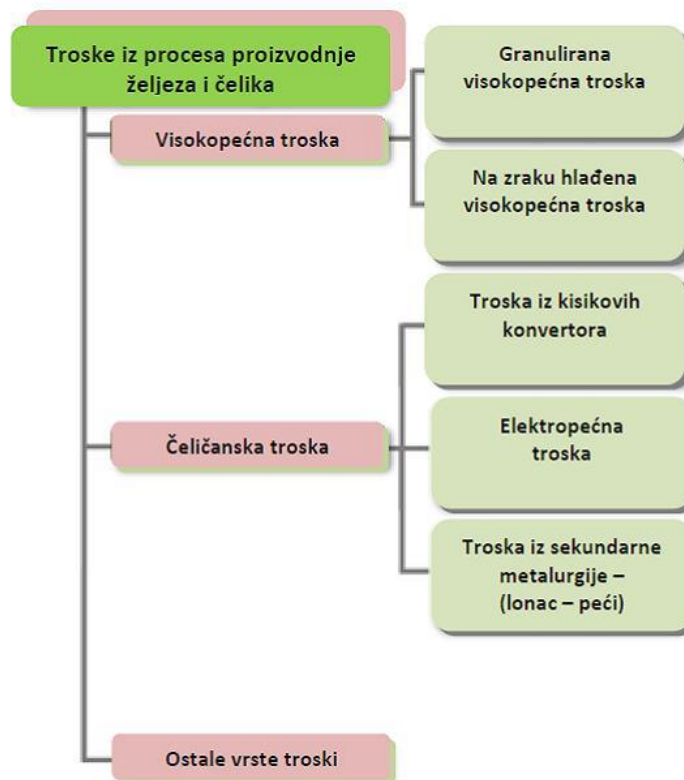


## 2. TROSKA

Troska ili zgura nastaje tijekom taljenja metala. Zbog manje gustoće od rastaljenog metala, pliva na površini te zaštićuje rastaljeni metal od oksidacije. Svojstva troske imaju utjecaj na proizvodnju i kvalitetu čelika. Troska ima sposobnost vezanja onečišćenih tvari iz metalne taline na sebe, te tako omogućava razdvajanje jalovine od metala. Taljenjem željeza u visokoj peći dobivaju se velike količine troske. Koristi se za proizvodnju umjetnog gnojiva, građevinskog materijala, izolacijskog materijala te u druge svrhe. Zbog svoje korisnosti i široke primjene smatra se nusproizvodom industrije čelika [1,2].

### 2.1. Vrste troske

Prema procesu u kojem nastaje troska se dijeli na željeznu trosku koja uključuje visokopećnu trosku i čeličansku trosku, te neželjeznu trosku koja nastaje proizvodnjom neželjeznih odnosno obojenih metala (Al, Cu, Zn, Pb, Ni). Postoje i troske koje su nastale u termoenergetskim postrojenjima te troske nastale u spalionicama otpada. S obzirom na mjesto nastanka uz spomenutu visokopećnu i čeličansku trosku, u željezne troske se ubrajaju tzv. ostale troske koje nastaju radom sekundarne metalurgije. Slika 1 prikazuje vrste željezne troske [3].



Slika 1. Troske iz procesa proizvodnje željeza i čelika [4]

### 3. PROIZVODNJA ČELIKA

Najpoznatiji načini dobivanja čelika u današnje vrijeme su putem kisikovih konvertora i proizvodnjom u elektrolučnoj peći. Glavna razlika u proizvodnji čelika između ova dva postupka je vrsta sirovina koje upotrebljavaju. Kod kisikovih konvertora pretežito se koristi sirovo željezo i čelični otpad u količinama manjim od 30 %, dok kod elektrolučnog postupka glavna sirovina je čelični otpad, a još se kao uložak u odrađenom dijelu može koristiti rastaljeno sirovo željezo, te vrući metal dobiven redukcijskim taljenjem [5]. U tablici 1. prikazana je količina proizvedenog čelika u svijetu, Europskoj uniji te Hrvatskoj u razdoblju od 2007. do 2016. godine [6].

Tablica 1. Količine proizvedenog čelika u razdoblju od 2007. do 2016. godine [6]

Godina	Proizvodnja čelika, 10 <sup>3</sup> t		
	Svijet	EU	Hrvatska
2007.	1.348.108	210.260	75
2008.	1.343.429	198.705	89
2009.	1.238.755	139.436	43
2010.	1.433.433	172.911	95
2011.	1.538.003	177.791	96
2012.	1.560.131	168.589	1
2013.	1.650.354	166.356	135
2014.	1.669.894	169.301	167
2015.	1.620.408	166.115	122
2016.	1.627.004	162.024	0

Pri proizvodnji čelika putem kisikovih konvertora kao nusproizvod nastaje troska čija se količina kreće u razmjerima od 85 do 165 kg po toni čelika, dok kod elektrolučnog postupka nastala troska kreće se od 60 pa sve do 270 kg po toni elektročelika. Na temelju tih podataka uzeta je prosječna količina nastale čeličanske troske od 100 kg po toni proizvedenog čelika. Nastale količine čeličanske troske u svijetu u razdoblju od 2007. do 2016. godine procjenjuju se na 1.500 milijuna tona, u Europskoj uniji na 173 milijuna tona te u Hrvatskoj na oko 82.300 tona godišnje [7].

#### 3.1. Proizvodnja čelika elektropećnim postupkom

U svijetu u razdoblju od 2007. do 2016. godine proizvelo se od 431 milijuna tona (2007.) do 417 mil. t (2016.) čelika elektropećnim postupkom. U Europi su se te količine kretale od 84 mil. t (2007.) do 63 mil. t (2016.). Podataka o nastaloj troski nema pa se količine nastale troske mogu samo procijeniti na temelju prosječno nastale troske po toni proizvedenog čelika (tablica 2) [6].

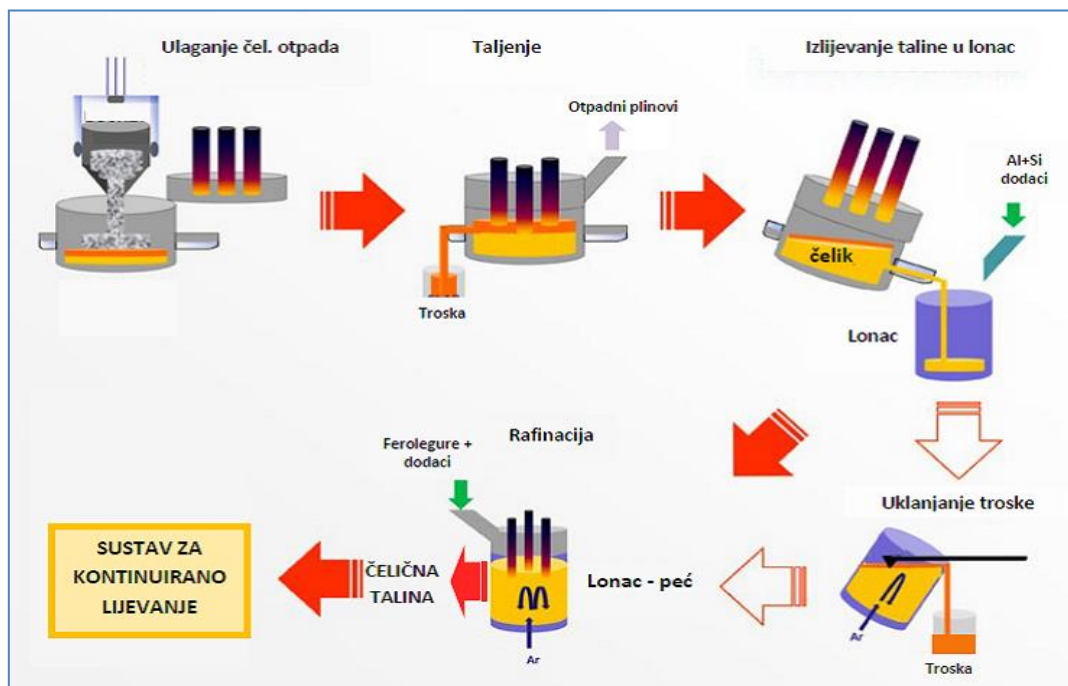
Proizvodnja čelika elektropećnim postupkom može se odvijati u dvije peći: elektrolučnoj peći i lonac-peći. Postupak dobivanja čelika sastoji se od nekoliko koraka:

1. Ulaganje metalnog uložka
2. Taljenje
3. Oksidacija i rafinacija
4. Izlijevanje u lonac

Kod ulaganja metalnog uloška kao sirovina se koristi čelični otpad s različitim nemetalnim dodacima da bi se snizilo talište troske. U elektrolučnoj peći za vrijeme taljenja čelika formira se crna troska, dok u lonac-peći nastaje bijela troska. Nakon što je troska nastala u elektrolučnoj peći, hidraulički mehanizam naginje peć te se crna troska izliva. Na slici 2 možemo vidjeti shemu proizvodnje čelika elektrolučnim postupkom s kombinacijom lonac-peći [1].

Tablica 2. Količine proizvedenog čelika elektropećnim postupkom i procijenjena količina nastale troske [6].

PROIZVODNJA ČELIKA U ELEKTROPEĆI			SVIJET		EU	
GODINA	SVIJET	EUROPA	CRNA TROSKA	BIJELA TROSKA	CRNA TROSKA	BIJELA TROSKA
2007.	431.466.000	84.708.000	71.191.890	19.415.970	13.976.820	3.811.860
2008.	429.295.000	82.740.000	70.833.675	19.318.275	13.652.100	3.723.300
2009.	356.541.000	61.226.000	58.829.265	16.044.345	10.102.290	2.755.170
2010.	421.750.000	71.147.000	69.588.750	18.978.750	11.739.255	3.201.615
2011.	454.198.000	75.825.000	74.942.670	20.438.910	12.511.125	3.412.125
2012.	448.349.000	70.487.000	73.977.585	20.175.705	11.630.355	3.171.915
2013.	428.808.000	66.292.000	70.753.320	19.296.360	10.938.180	2.983.140
2014.	430.042.000	66.039.000	70.956.930	19.351.890	10.896.435	2.971.755
2015.	408.670.000	65.497.000	67.430.550	18.390.150	10.807.005	2.947.365
2016.	417.719.000	63.962.000	68.923.635	18.797.355	10.553.730	2.878.290
UKUPNO	4.226.838.000	707.923.000	697.428.270	190.207.710	116.807.295	31.856.535



Slika 2. Shema proizvodnje čelika elektrolučnim postupkom uz kombinaciju lonac-peć [8].

Kao uložak za elektrolučnu peć najčešće se koristi „staro željezo“. Da bi se poboljšala kvaliteta i sastav čelika ponekad se dodaje sirovo željezo jer ima nizak sadržaj oligoelemenata. Onečišćenja u elektrolučnoj peći dolaze od različitih tvari anorganskog i organskog podrijetla koje se nalaze u čeličnom otpadu te se tijekom procesa taljenja oslobađaju u obliku plinova, para i prašine. Faza sekundarne metalurgije nastupa prelijevanjem rastaljene čelične taline iz elektrolučne peći u lonac-peć na rafinaciju. Sekundarna faza uključuje niz kemijskih reakcija oksidacije poput odsumporavanja, odfosforavanja, itd. Rafinacija čelika provodi se radi dobivanja čelika željenog kemijskog sastava te je to od velike važnosti. Rafinacija se provodi dodatkom ferolegura izravno u lonac-peć. U lonac-peći formira se bijela troska koja ima korisnu svrhu jer apsorbira produkte reakcije, sprječava hlađenje taline, uklanja štetne primjese sumpora, sprječava reoksidaciju taline kisikom iz zraka itd. Kada je talina postigla željeni sastav odvodimo je u sustav za kontinuirano lijevanje gdje se lijevaju poluproizvodi koji se dalje prerađuju u konačne proizvode postupcima valjanja, kovanja ili vučenja. Elektrolučna peć na ovaj način ima za svrhu pretaljivanje čelika, dok uloga lonac-peći je za rafinaciju i dobivanje čelika željenog sastava [1,7].

### **3.1.1. Elektrolučna peć**

Elektrolučna peć najraširenija je vrsta peći za proizvodnju čelika koju je izumio francuski kemičar Paul Louis Heroult na prijelazu s 19. na 20. stoljeće. Prva industrijska elektrolučna peć krenula je raditi u Njemačkoj 1906. godine, a 1917. godine u pogonu je bilo 733 peći. U posljednjih 20-ak godina proizvodnja elektročelika je dosta povećana, a glavni razlozi za to su niska cijena i tehnološke prednosti.

Elektrolučne peći se prema veličini dijele na:

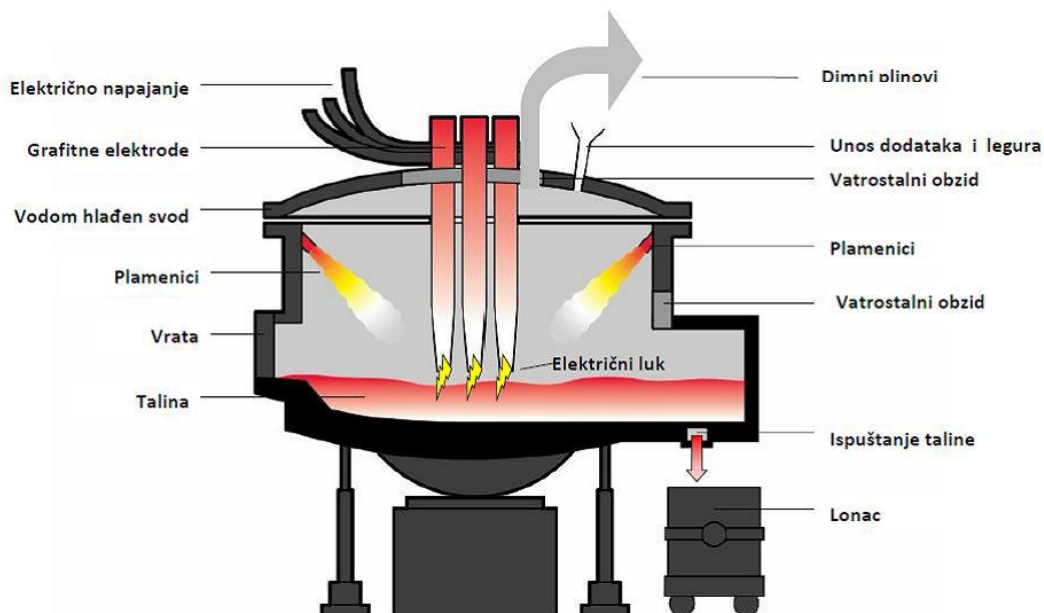
- male elektrolučne peći kapaciteta do 50 tona,
- srednje elektrolučne peći kapaciteta od 50 do 100 tona,
- velike elektrolučne peći kapaciteta od 100 do 200 tona.

Kapacitet suvremene elektrolučne peći (slika 3) je do 180 tona, no daljnjim istraživanjem došlo se do spoznaje da veći kapacitet peći smanjuje cijenu proizvodnje čelika te se u današnje vrijeme grade elektrolučne peći većih kapaciteta. U provedenim istraživanjima došlo se do rezultata da u prijelazu s elektrolučne peći od 10 tona na elektrolučnu peć od 30 tona cijena proizvodnje čelika pada za 25 %, dok prijelazom s elektrolučne peći kapaciteta 30 tona na elektrolučnu peć kapaciteta od 70 tona, proizvodnja čelika može biti jeftinija i 50%. Razvojem tehnologije, u današnje vrijeme postoje peći koje se odlikuju velikom fleksibilnošću. Takve peći nazivamo visokoučinskim pećima te one čine jezgru mini-čeličana [1].



Slika 3. Elektrolučna peć [9]

Što se tiče izgleda, elektrolučna peć je cilindričnog oblika i sastoji se od podnice, svoda, plašta, izljevnog otvora, vodom hlađenih otvora za tri elektrode, uređaja za nagibanje, uređaja za zakretanje svoda, držača elektroda, transformatora i ostale prateće opreme. Podnica se sastoji od sferično oblikovane čelične posude, plašt je cilindričnog oblika, a svod sferičnog oblika [1]. Shematski prikaz elektrolučne peći prikazan je na slici 4.



Slika 4. Shema elektrolučne peći [10]

### **3.1.2. Lonac-peć**

Početak 1980. godine uz visokoučinske peći postavlja se lonac-peć (slika 5), tj. lonac u kojem se talina osim rafiniranja, dezoksidacije i otplinjavanja može i grijati. Lonac-peć rasterećuje elektrolučnu peć, provodi veliki broj metalurških radnji te ispušta taline niže temperature. Tim radnjama štedi se energija i vatrostalni materijal. U lonac-peći proizvode se konstrukcijski, niskougljični, srednjeugljični, visokougljični, visokočvrsti, mikrolegirani čelici, čelici namjenjeni toplinskoj obradi itd. Da bi se gubici topline kod obrade čelika kompenzirali, talina mora biti pregrijana, a maksimalna pregrijanost iznosi 70 °C. Zagrijavanje lonca provodi se električnim lukom kojeg proizvode grafitne elektrode. Tijekom dogrijavanja, talina se kontinuirano miješa s inertnim plinom koji se uvodi kroz porozni čep. Miješanjem taline i inertnog plina temperatura i sastav taline se ujednačavaju te se u volumenu taline ubrzavaju kemijske reakcije. Talina se nakon lonac-peći odvodi u sustav za kontinuirano lijevanje pa se tamo lijeva u poluproizvode ili ingote [1].



Slika 5. Lonac-peć [11]

### **3.1.3. Troska iz elektropečnog postupka**

Proizvodnjom čelika elektropečnim postupkom nastaju dvije vrste troski. Proizvodnjom ugljičnih čelika nastaje crna troska, dok kod proizvodnje visoko legiranih čelika nastaje bijela troska. Elektropečna troska sastoji se od niza oksidnih komponenata, a kemijski sastav im je složen. Crna troska (slika 6) se uklanja nakon što se završi proces taljenja uzorka te se talina izlijeva u lonac-peć. Nakon toga u lonac-peći se odvijaju postupci sekundarne metalurgije. Nakon obrade taline u lonac-peći, slijedi odvajanje bijele troske (slika 7) [12].





Slika 6. Crna troska [13]



Slika 7. Bijela troska [14].

Razlika između crne troske i bijele troske je u sastavu pojedinih elemenata. U tablici 3 možemo vidjeti sastave crne i bijele troske te se primjećuju razlike u sastavu [15].

Tablica 3. Sastavi crne i bijele troske [15].

Oksid	w (%)	
	Crna troska	Bijela troska
CaO	18.4-60.0	30-60
FeO	2.5-41.2	0-15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0-31.2	-
SiO <sub>2</sub>	6.5-35.0	2-35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-13.44	4.1-35.76
MgO	1.3-31.3	1-12.6
MnO	0.6-12.0	0-5
Na <sub>2</sub> O	0.06-0.5	0.06-0.07
K <sub>2</sub> O	0.02-0.2	0.01-0.02

### 3.2. Proizvodnja čelika putem kisikovitog konvertora

U svijetu u razdoblju od 2007. do 2016. godine proizvelo se od 882 milijuna tona (2007.) do 1.2 milijarde t (2016.) čelika putem kisikovih konvertora. U Europi su se te količine kretale od 124 mil. t (2007.) do 98 mil. t (2016.). Prema podacima iz tablice vidljivo je da je količina proizvedenog čelika u kisikovom konvertoru u svijetu porasla, dok je u Europi blago pala. Podataka o nastaloj troski nema pa se količine nastale troske mogu samo procijeniti na temelju prosječno nastale troske po toni proizvedenog čelika (tablica 3.) [6]

Tablica 3. Količine proizvedenog čelika u kisikovom konvertoru i procijenjena količina nastale troske [6]

PROIZVODNJA ČELIKA U KISIKOVOM KONVERTORU			SVIJET	EU
GODINA	SVIJET	EUROPA	TROSKA	TROSKA
2007.	882.076.000	124.857.000	110.259.500	15.607.125
2008.	884.767.000	115.329.000	110.595.875	14.416.125
2009.	865.381.000	77.518.000	108.172.625	9.689.750
2010.	993.374.000	101.116.000	124.171.750	12.639.500
2011.	1.065.079.000	101.966.000	133.134.875	12.745.750
2012.	1.099.079.000	98.103.000	137.384.875	12.262.875
2013.	1.209.799.000	100.067.000	151.224.875	12.508.375
2014.	1.224.934.000	103.265.000	153.116.750	12.908.125
2015.	1.202.651.000	100.864.000	150.331.375	12.608.000
2016.	1.199.777.000	98.058.000	149.972.125	12.257.250
UKUPNO	10.626.917.000	1.021.143.000	1.328.364.625	127.642.875

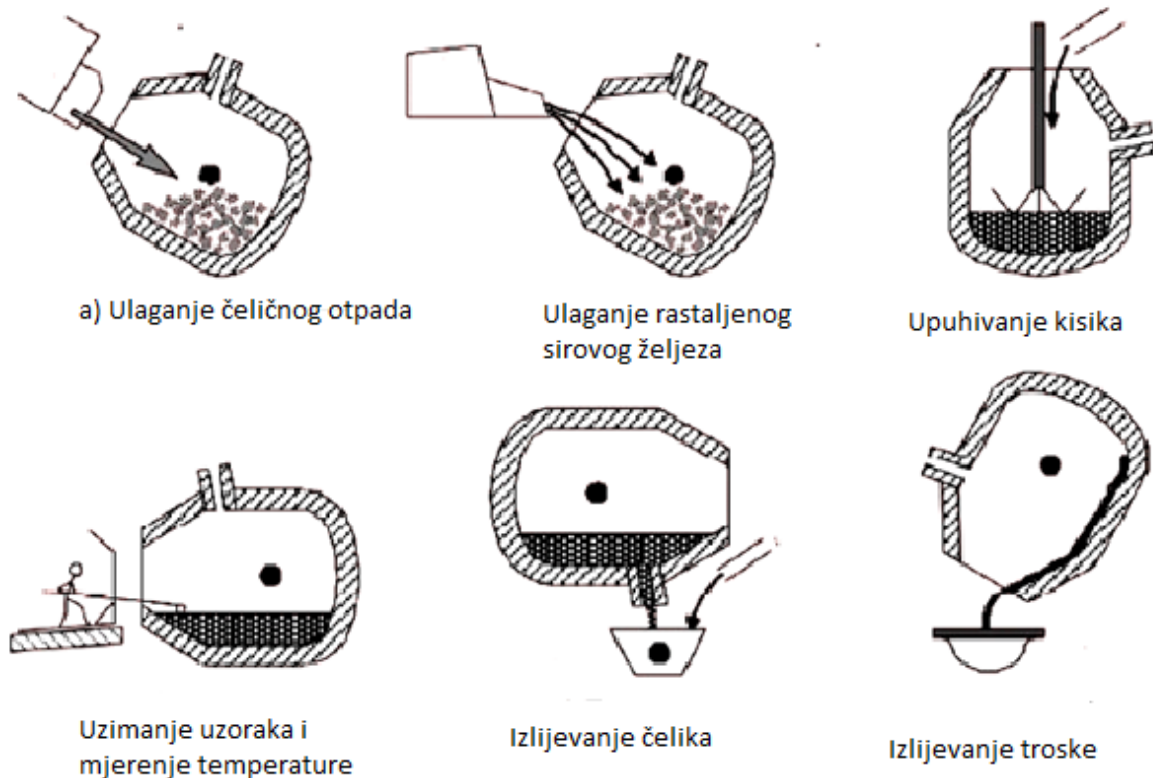
Proizvodnja čelika putem kisikovog konvertora odvija se uz korištenje kisika. Osnovni ciljevi ovog postupka su:

- Smanjivanje sadržaja ugljika s oko 4% na manje od 1%,
- Smanjivanje sadržaja sumpora i fosfora dodavanjem vapna, fluorita, Na ili Mg-karbonate,
- Povećanje temperature taline na oko 1650 °C [7].

Kisik koji se koristi mora imati čistoću preko 99.5 %. Količina potrebnog kisika za konvertore kapaciteta 230-300 t je 640-900 Nm<sup>3</sup>/min.

U nagnuti konvertor ubaci se čelični otpad koji je na sobnoj temperaturi i ulije tekuće sirovo željezo koje je na temperaturi od oko 1340 °C. Konvertor se ispravi i zatim počinje upuhivanje kisika kroz vodom hlađeno kisikovo koplje. Kisik se upuhuje u talinu u nekoliko koraka. U zadnjem koraku koplje se nalazi na udaljenosti od 2-2,4 metra od taline. Kada nestane lepršavi plamen na ušću konvertora postupak je gotov te se kisikovo koplje izvlači i prestaje upuhivanje kisika. Uzima se uzorak taline za kemijsku analizu i mjerenje temperature, te ako je sve uredu, konvertor se nagnje te se pažljivo odlije većinski dio troske, a ostatak troske se zatvori da ne može izaći prilikom izlivanja tekućeg čelika [1]. Shematski prikaz proizvodnje čelika u kisikovom konvertoru prikazan je na slici 8 [16].





Slika 8. Shematski prikaz proizvodnje čelika u kisikovom konvertoru [16]

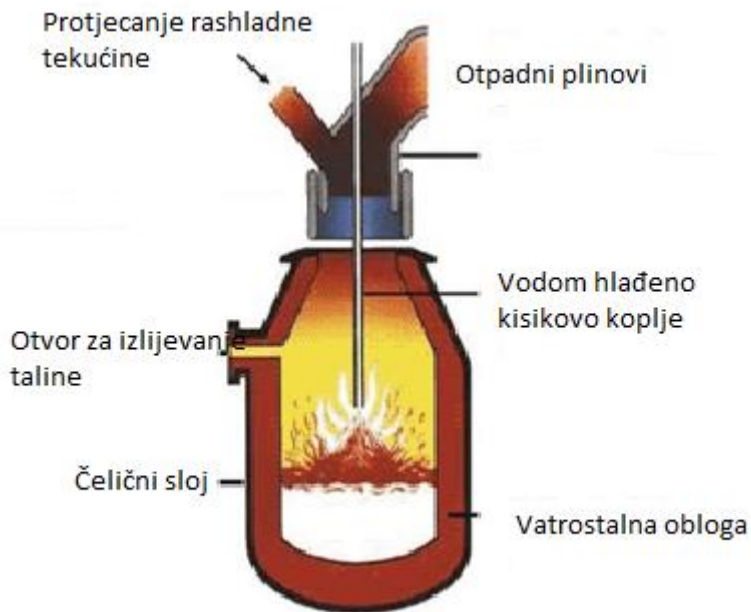
### 3.2.1. Kisikov konvertor

Prema uvođenju kisika u talinu, kisikovi konvertori se dijele na tri vrste:

- Kisikovi konvertori s upuhivanjem kisika odozgo (LD, BOF),
- Kisikovi konvertori s upuhivanjem kisika odozdo (OBM),
- Kisikovi konvertori s kombiniranim upuhivanjem kisika (K-OBM).

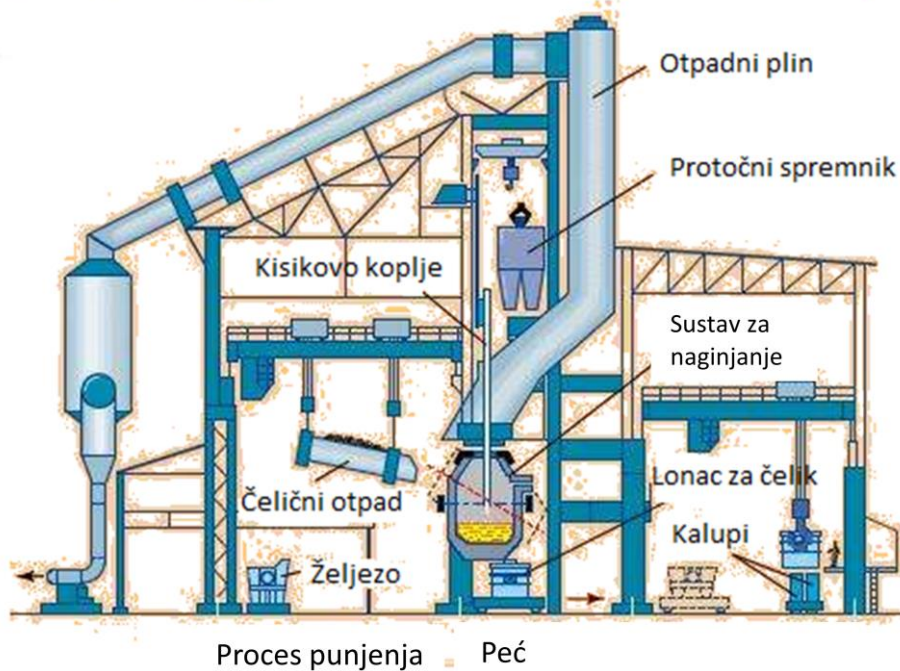
Najzastupljeniji u današnje vrijeme su konvertori kod kojih se kisik upuhuje odozgo te se tim postupkom proizvede 85 % čelika od ukupne proizvodnje čelika u konvertorima. Godine 1949. u Linzu započelo se s istraživanjem upuhivanja kisika odozgo te je početkom pedesetih u Linzu i Donawitzu došlo do razvijanja procesa i uvođenja u industrijsku primjenu LD konvertora (Linz-Donawitz). Kisikovi konvertori brzo su prihvaćeni u svijetu zbog manjih troškova i bolje efikasnosti pa su se zbog toga počeli graditi LD konvertori kapaciteta od 50 do 500 t [1].

Konvertor je okomita valjkasta posuda obložena vatrostalnim materijalom. Otvorena je odozgo radi dizanja i spuštanja kisikovog koplja (slika 9).



Slika 9. Prikaz konstrukcije kisikovog konvertora [17]

Kod velikih kisikovih konvertora kapaciteta 360 t, konvertor je obično promjera 8 metara i visine 11 metara, a obloga konvertora nije manja od 1 metar. Kisikova koplja kod većih konvertora su dužine oko 21 metar i promjera 300 milimetara. Sadrže 3 do 5 mlaznica kroz koje izlazi čisti kisik. Hlade se vodom što je od velike važnosti. Podizanje i spuštanje kisikovih koplja se vrši pomoću dizalice te se pomoću njih podešava i udaljenost [18]. Na slici 10 prikazan je pogon kisikovog konvertora [19].



Slika 10. Shematski prikaz pogona kisikovog konvertora [19]

### 3.2.2. Troska iz kisikovog konvertora

Na početku upuhivanja kisika u konvertor, dodaju se talitelji koji u kombinaciji sa silicijem, manganom, željezom i fosforom stvaraju tekuću trosku. Prva troska koja nastane bogata je  $\text{SiO}_2$  i  $\text{FeO}$ . Nakon dodavanja velikih količina vapna, kisikovo koplje spušta se bliže talini te počinje pjenjenje troske. Vapno se u talini otapa, a količina troske raste. Temperatura taline raste od  $1350\text{ }^\circ\text{C}$  na  $1650\text{ }^\circ\text{C}$ , dok je temperatura troske obično  $50\text{ }^\circ\text{C}$  veća. Nakon završne faze upuhivanja kisika, troska pliva na površini taline te štiti talinu od atmosferskog utjecaja (oksidacije). Nakon što se talina pažljivo izlije u lonac za čelik, zaostala troska izlije se u lonac za trosku te ide na daljnju obradu. Izgled troske iz kisikovog konvertora je prikazan je na slici 11, a prosječni kemijski sastav ovakvog tipa troske dan je u tablici 5. [1,20]

Tablica 5. Prosječni kemijski sastav [20]

Kemijski spoj	Mas. (%)
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	25.8
$\text{CaO}$	42.7
$\text{SiO}_2$	12.7
$\text{MgO}$	6.6
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3.2



Slika 11. Krupniji primjerak troske iz kisikovog konvertora [21].

## 4. OPORABA TOPLINE TROSKE

Jedan od glavnih ciljeva industrije je smanjenje potrošnje energije kroz njenu uporabu. S obzirom na količine nastale troske te da otpadna toplina u čeličanama najviše dolazi od troske sve više se istražuju mogućnosti kako iskoristiti njenu toplinsku energiju [22].

Oporaba topline troske nije jednostavan proces jer uklanjanjem njezine topline mijenjamo agregatno stanje troske iz tekućeg u kruto. Na površini troske koja se hladi nastaje čvrsti sloj koji usporava gubitak topline te skrućivanje troske sprječava daljnji protok troske kroz izmjenjivač topline i uređaje za prijenos topline.

Prijašnjih godina, troska se odlagala na tlo ili jame gdje se hladila i skrućivala bez pokušaja da se iskoristi njezina toplina. Ohlađena troska se obrađivala i koristila u industriji za proizvodnju cementa, betona itd. Istraživanja su pokazala da obrađena troska ima komercijalnu vrijednost, što je rezultiralo razvojem drugih procesa za obradu troske. Većina procesa zahtjeva brzo hlađenje troske te se došlo do ideje da se toplina od troske uporabi i iskoristi.

Procjenjuje se da je više od 40 % energije za taljenje u peći sadržano u troski nakon procesa dobivanja metalnih polu proizvoda ili proizvoda [23]. S obzirom na količinu topline koju sadrži troska nametnula se ideja uporabe topline ponovnim korištenjem u samom procesu taljenje ili kroz proizvodnju toplinske energije koja se može dalje pretvoriti u električnu. Prema autoru Bejan A. [24] se procjenjuje da 1 t čelika proizvodi 300 kg troske s toplinskom energijom od 1.8 GJ (500 kWh). Ako gledamo podatke za svjetsku proizvodnju čelika (tablica 1) u razdoblju od 2007. do 2016. godine proizvelo se ukupno 1.627.004.000 tona čelika što prema literaturi [24] daje toplinsku energiju od 2.928.607.200 GJ (cca. 3 EJ) ili 813,502 TWh. Gledano godišnje to je otprilike cca. 81 TWh te ako to usporedimo s prosječnom godišnjom potrošnjom energije u Hrvatskoj [25] od 16 TWh možemo doći do zaključka da samo energija od troske u čeličanama svijeta prelazi 5 trenutačnih godišnjih potreba Hrvatske.

Nakon uporabe topline od troski ohlađene troske imaju komercijalnu vrijednost prevađanjem u željeni oblik uz kontrolirano hlađenje s ciljem postizanja potrebnih svojstava. Razvijeno je nekoliko procesa za obradu troske i uporabu topline. Jedan od procesa je proizvodnja pare ili vruće vode za korištenje u proizvodnji električne energije ili u drugim industrijskim procesima što je dovelo do razvoja novih sustava za uporabu toplinske energije troske.

Obrada tekuće troske uključuje proizvodnju granula postupkom brzog hlađenja kapljica tekuće troske. Time se dobiva proizvod sličan riječnom pijesku koji se koristi u industrijama cementa i betona. Da bi se proizvele granule s odgovarajućim svojstvima potrebno je tekuću trosku hladiti kontroliranim brzinama. Oporaba ove topline i mogućnost ponovnog korištenja za druge procese, predstavlja uštedu energije i smanjenje troškova.

Jedna od prvih korištenih postupaka je metoda vlažne granulacije koja je korištena za proizvodnju granula izravnim hlađenjem vodom, međutim to je zahtijevalo velike količine vode i rezultiralo dobivanjem mokrog završnog proizvoda koji je trebao dodatnu toplinu za sušenje. Izravni dodir s vodom za hlađenje je rezultirao nastajanjem nečistoća u vodi koja se kao takva nije mogla koristiti izravno u drugim procesima.

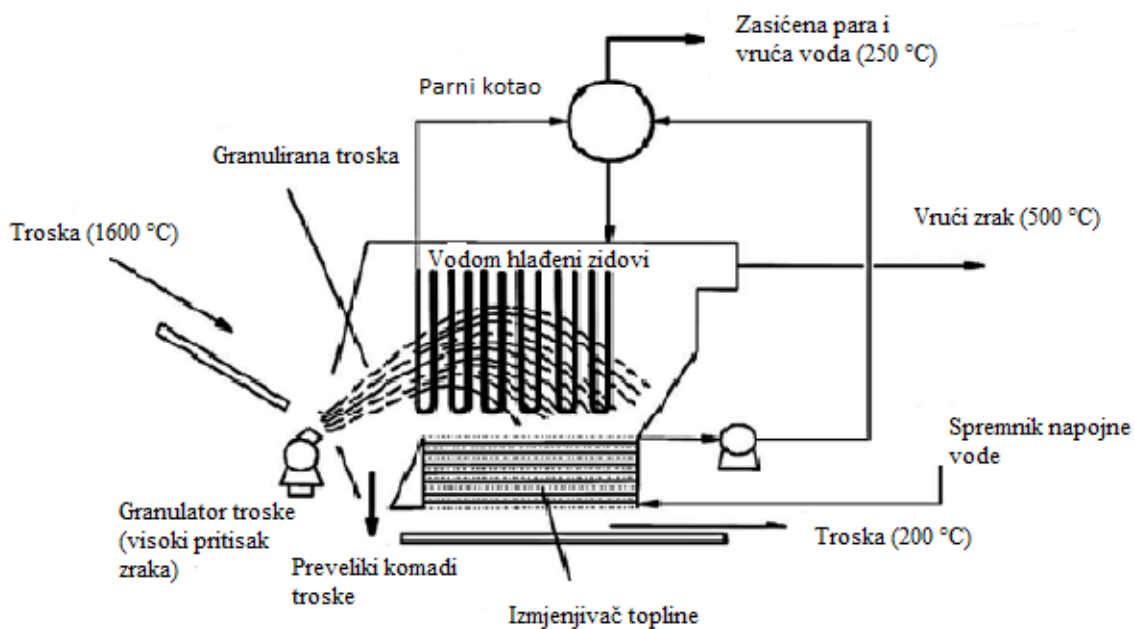
Suha granulacija se pokazala kao novo rješenje, a uključuje prelazak tekuće troske u kapljice te granule u fazi hlađenja uz iskorištenje topline. Visoko temperaturne granule se dalje kontrolirano hlade. Tijekom suhe granulacije toplina se oporavlja u dvije faze. Prva faza je da se toplina kapljica na  $\approx 1500$  °C odvodi zrakom te se dobivaju granule temperature  $\approx 800$  °C koje se u drugoj fazi dalje hlade zrakom. Toplina od 200 °C do sobne se dodatno prenosi konvekcijom kroz stjenke izmjenjivača na rashladni zrak ili vodu.

Razvijeno je nekoliko različitih tipova uređaja za proizvodnju granula iz tekuće troske te iskorištavanja topline iz postupka granuliranja [26].

#### 4.1. Postupci oporabe topline granuliranjem

##### 4.1.1. Granuliranje zračnim propuhivanjem

U procesu propuhivanja upuhuje se zrak velikom brzinom uz visoki tlak u tok tekuće troske te nastaju sitne čestice troske (slika 12). Granule troske predaju toplinu vodom hlađenom zidu, nakon čega padaju na izmjenjivač topline uz daljnji prijenos topline. Zagrijana voda i zasićena para te vrući zrak iz izmjenjivača topline i vodom hlađenog zida odlaze dalje u procese gdje se iskorištava njihova toplina (parni kotao, itd.). Prvo postrojenje za obradu troske u svijetu je izgrađeno 1981. godine. U tom procesu nastaju granule i zagrijani zrak koji odlazi u kotao gdje se vrši daljnji prijenos topline [27].

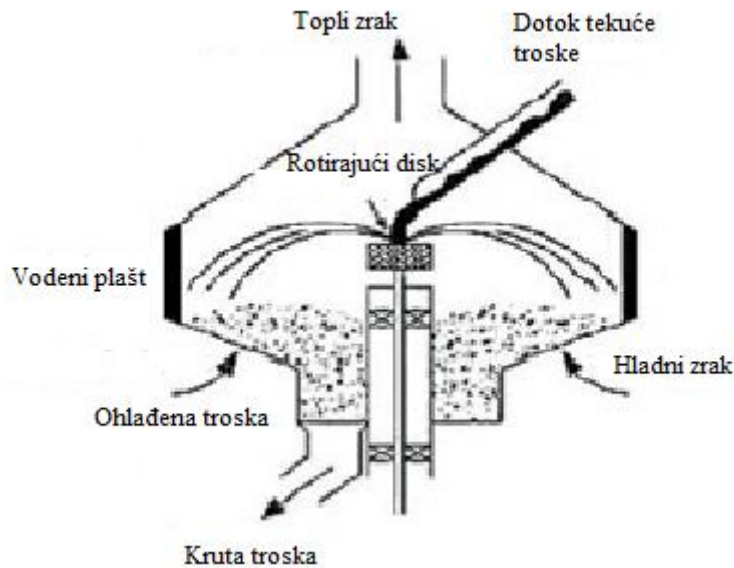


Slika 12. Granulacija propuhivanjem zrakom [27]

##### 4.1.2. Atomizacija rotirajućom „šalicom“

U postupku atomizacije, RCA (eng. *rotary cup atomizer*) tekuća troska izliva se na rotirajuću „šalicu“ koja je velikom brzinom raspršuje te se troska skrućuje u zraku i pada na dno (slika 13). Hladni zrak prolazi kroz krutu trosku, uzima toplinu i izlazi iz procesa te se dalje primjenjuje u određene svrhe, npr. za zagrijavanje vode [28].

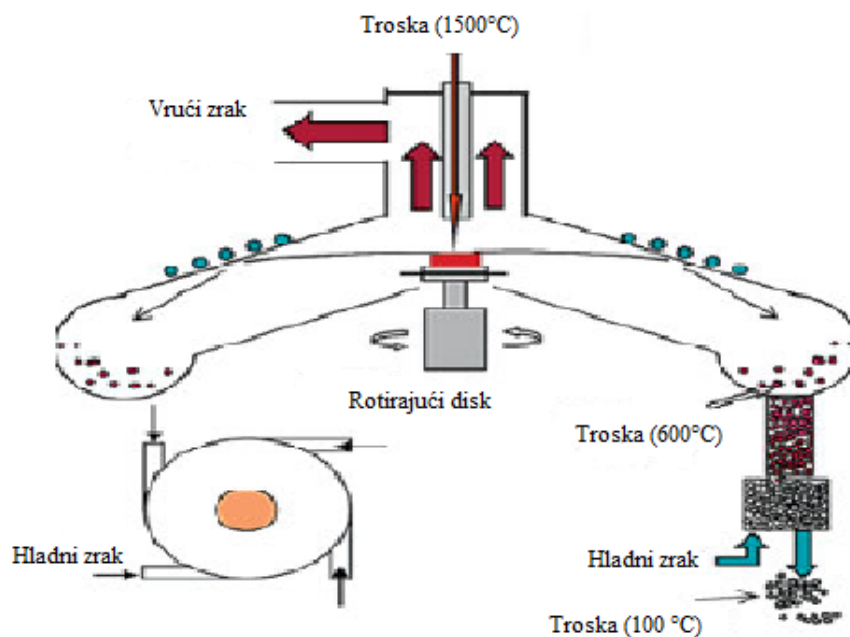




Slika 13. Atomizacija s rotirajućom „šalicom“ [28]

#### 4.1.3. Atomizacija s rotirajućim diskom

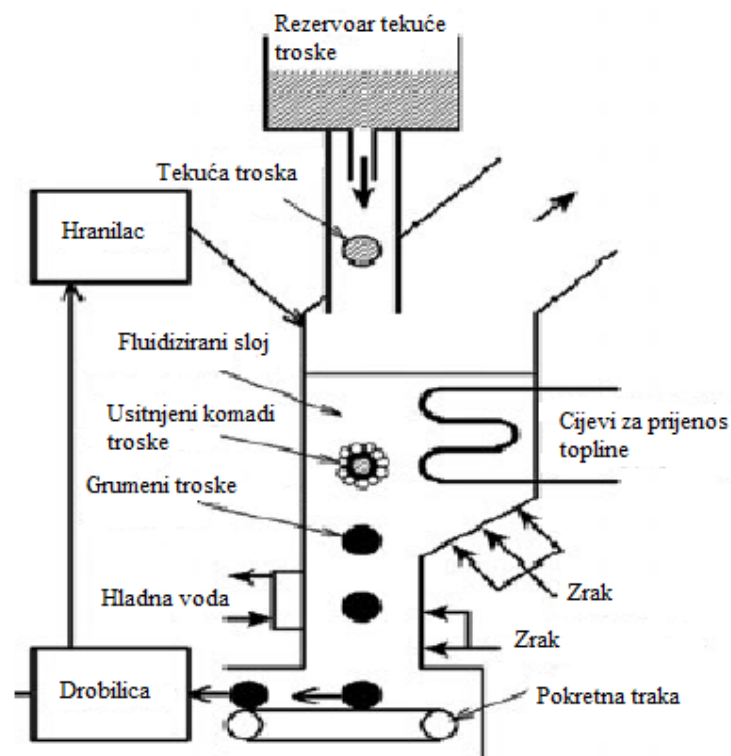
Princip rada s rotirajućim diskom (slika 14) je sličan kao i kod rotirajuće „šalice“ . Tekuća troska koja je na temperaturi od cca. 1500 °C odlazi na rotirajući disk koji ju raspršuje te se kapljice troske skrućuju u fine čestice i padaju u posudu pri temperaturi od 600 °C. Hladni zrak struji kroz čestice troske, zagrijava se i izlazi iz procesa. Ohlađena troska na temperaturi manjoj od 100 °C izlazi is procesa [29], a toplina odnesena zrakom se dalje oporabljuje.



Slika 14. Atomizacija s rotirajućim diskom [29].

#### 4.1.4. Granulator s fluidiziranim slojem

Tekuća troska koja ulazi u proces hladi se zrakom te se granule spajaju zajedno sa sitnim česticama troske iz hranilaca. Zajedno tvore krupnije grumene troske koji padaju na pokretnu traku i transportiraju se do drobilice. Sitne čestice troske kroz sito izlaze van iz drobilice, dok krupnije čestice se usitnjavaju i odlaze u hranilac. Zagrijani zrak koji je preuzeo toplinu od troske odlazi na izmjenjivač topline. Na slici 15 je prikazan granulator s fluidiziranim slojem [30].



Slika 15. Granulator s fluidiziranim slojem [30].

## 4.2. Kemijska ili fazno promjenljiva metoda za oporabu topline

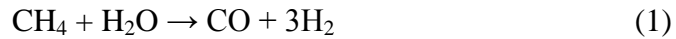
Do danas većina sustava za oporabu otpadne topline se koristi za proizvodnju tople vode ili pare. Zbog nedostatak tih sustava, troska se ne proizvodi kontinuirano nego u serijama što stvara poteškoće kod pohranjivanja pare i vruće vode. Upravo zato, novija istraživanja su usmjerena na sustave koji mogu dugoročno pohraniti energiju otpadne topline.

Parna i vruća voda ne zahtijeva „visoku kvalitetu“ topline te se toplina obično koristi za grijanje. U tom procesu, toplina iz visoko temperaturnog otpada se koristi kao niski izvor energije s niskom kvalitetom te se stoga smatra da je uobičajena metoda korištenja otpadne topline dobivanjem tople vode ili pare neučinkovita.

Mnoge reakcije u kemijskoj industriji su endotermne i zahtijevaju visoku kvalitetu topline visoke temperature koja se dobiva iz fosilnih goriva ili električne energije. Stoga, ako se otpadna toplina kombinira sa željenom endotermnom reakcijom može doći do značajnog očuvanja energije. Razmatrano je nekoliko procesa, kao što je reformiranje metanske pare za proizvodnju vodika, plinifikacije ugljena i proizvodnje vodika iz bioplina.

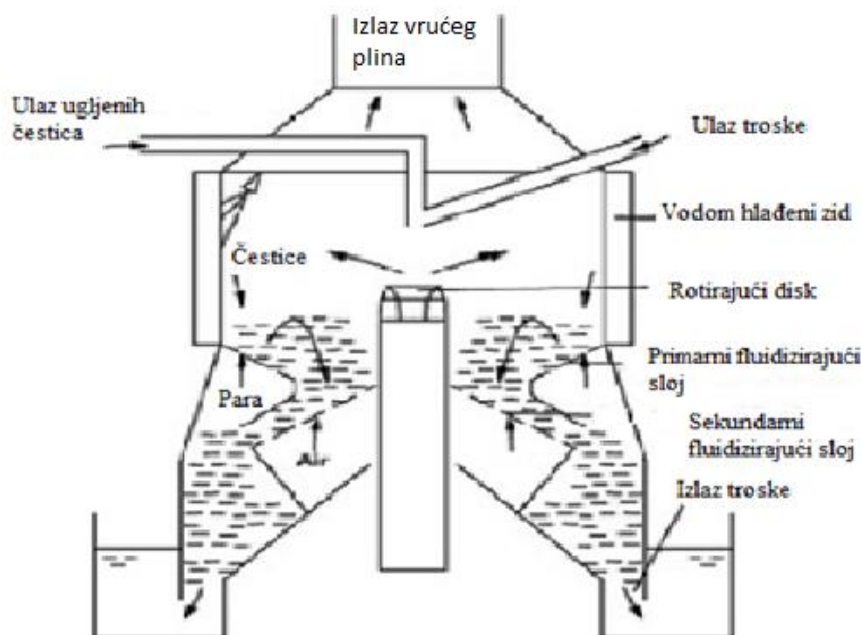
#### 4.2.1. Reformiranje metana

Proces reformiranja metana je energetski zahtjevan te se učestalo koristi za izravnu redukciju i proizvodnju metanola. Štoviše, ovaj postupak se također koristi za proizvodnju vodika iz prirodnog plina (jed.1).



Budući da je ekološki prihvatljiv resurs, vodik se smatra alternativnim izvorom energije i očekuje se da će njegova potražnja premašiti potražnju za fosilnim gorivima. Postupak koji je predložen gore ima mogućnost generiranja vodika korištenjem reakcijske topline iz visoko temperaturnog otpada, kao što je ispušni plin i troska nastala prilikom proizvodnje čelika [31].

U sustavu oporabe topline iz rastaljene troske, troska se granulira upotrebom atomizera s rotirajućom šalicom, RCA (eng. *rotary cup atomizer*) te nastaje sloj fino granulirane troske kao što je prikazano na slici 16. Kako bi se omogućilo povrat topline tijekom endotermne reakcija, metan i voda se uvode u fluidizirane slojeve. Na dnu RCA fluidizirani sloj pregrijava paru i metan gdje uz pomoć Ni katalizatora nastaju vodik i ugljični monoksid.



Slika 16. Proces reformiranja metana [31]

#### 4.2.2. Plinifikacija ugljena

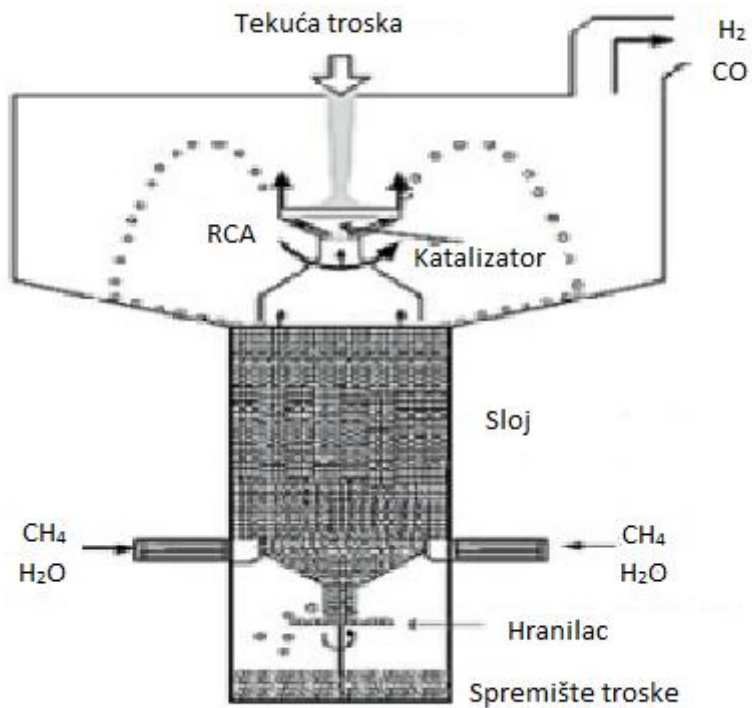
Reakcija plinifikacije prikazana je jednadžbom (2):



Na slici 17 je prikazan sustav za rasplinjavanje ugljena pomoću troske. Plinifikacija ugljena je endotermni proces, a troska iz čeličana u postupku obrade zahtijeva brzo hlađenje. Ugljena prašina i tekuća troska se miješaju prije dodavanja u RCA postupka. Smjesa se



granulira te dodaje u posebno oblikovanu kolonu za trosku uz propuhivanje sa zrakom gdje se toplinska energija troske prenosi na ugljen i zrak. Reakcija plinifikacije ugljena i skrutnjavanja troske se odvijaju istodobno, a preostali ugljeni prah izložen zraku u fluidiziranom sloju dalje izgara [27]. Nažalost u literaturi nema daljnjih podataka o daljnjem razvoju ove ideje.



Slika 17. Proces plinifikacije ugljena [27]

## 5. UPORABA TROSKE NAKON OPORABE TOPLINE

Nakon hlađenja troska se skladišti i transportira na daljnju uporabu [32]. U tablici je dan pregled mogućnosti iskorištavanja troski nakon hlađenja.

Tablica 6. Uporaba troske nakon hlađenja [33]

Primjena troske	Područje primjene				
	Graditeljstvo	Uređenje odlagališta otpada	Održavanje riječnih korita i morske obale	Ostala industrija	Poljoprivreda
Agregat u cestogradnji (asfaltne mješavine, nosivi slojevi)	x				
Agregat u industriji cementa i betona				x	
Sipina (sprječavanje poledice u zimskim uvjetima)	x				
Uređenje nasipa i obala rijeka	x		x		
Stabilizirani nosivi slojevi (sprječavanje erozije)	x		x		
Uređenje morskih luka i obala	x		x		
Nosivi sloj od zrnatog materijala	x				
Nasipanje neasfaltiranih cesta i putova	x				
Željeznički nasipi	x				
Neutraliziranje otpadnih voda rudarske industrije	x		x		
Agrotehničke mjere (reguliranje pH tla, donor Ca, Mg i sl.)					x
Granulirana ispuna (posteljice) kod polaganja cjevovoda, nasipanje neasfaltiranih parkirališta i sl.	x				
U čeličanama kao talitelj			x	x	
Pokrivanje otpada na odlagalištima		x			
Nasipni materijali (krajobrazna arhitektura)	x				
Ispuna za drenaže	x				
Pokrivalo krovova				x	
Punilo pri proizvodnji različitih proizvoda (boje, polimerni materijali, adhezivna sredstva)				x	
Mineralna vuna (izolacijski materijali)				x	

Kao što je vidljivo troska se može koristiti u razne svrhe što u konačnici može dovesti do smanjenja korištenja prirodnih materijala.

## 6. ZAKLJUČAK

Jedan od najvažnijih materijala današnjice je čelik te je njegova proizvodnja dosegla 1,6 milijardi tona godišnje. Čelik se najčešće dobiva putem kisikovog konvertora te elektrolučnim postupkom prilikom kojih dolazi do nastajanja troski koja se po svojim svojstvima svrstava među neopasni otpad ali zbog svojih korisnih svojstava troska je zapravo nusproizvod. Nadalje, zbog visoke temperature izlazne troske, prije njezine daljnje primjene potrebno ju je ohladiti. Odlaganjem i hlađenjem troske velike količine topline odlaze u nepovrat što je rezultiralo idejom da se ta toplina iskoristi.

Prema literaturi se procjenjuje da 300 kg troske ima toplinsku energiju od 1.8 GJ (500 kWh). Gledano godišnje to je otprilike cca. 81 TWh na svjetskoj razini što prelazi 5 trenutačnih godišnjih potreba Hrvatske.

Razvijeno je nekoliko procesa za obradu troske i oporabu topline od nastale troske koji se temelje na uporabi topline granuliranjem te kemijsko faznim promjenama. Oporaba topline uključuje proizvodnju pare i vruće vode koje se zatim koriste za proizvodnju električne energije ili u drugim procesima. Procesima oporabe topline dobiva se i granulirana troska željenih svojstava koja se može daljnje primjenjivati u graditeljstvu, cestogradnji, poljoprivredi itd.

## 7. LITERATURA

- [1] Gojić M., Metalurgija čelika, Denona d.o.o., Zagreb, 2005.
- [2] <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=62469> ( 21.6. 2018.)
- [3] Sandev D., Utjecaj troske iz elektropeći na rast i fiziološke procese graha, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovni-matematički fakultet, 2016.
- [4] Selanec M., Troska iz procesa proizvodnje čelika elektropečnim postupkom kao mineralni agregat u cestogradnji, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2015.
- [5] <https://www.worldsteel.org/about-steel.html> (21.6.2018.)
- [6] The World Steel Assosiation, Steel Statistical Yearbook, 2017.
- [7] Sofilić T., Brnardić, I.: Održivo gospodarenje otpadom, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2013.
- [8] <http://econ243.academic.wlu.edu/2016/03/07/bof-and-eaf-steels-what-are-the-differences/> (21.6.2018)
- [9] <http://interpipesteel.biz/en/about-mill/electric-arc-furnace> (23.6.2018.)
- [10] <http://tehnologicaland.blogspot.com/2010/11/steelmaking.html> (23.6.2018.)
- [11] [http://brooksinbeta.com/4122/global-ladle-furnace-market-status-2018-2023-ghi-hornos-industriales-daido-steel-cnes-aeiforos-metal-processing-s-a/`](http://brooksinbeta.com/4122/global-ladle-furnace-market-status-2018-2023-ghi-hornos-industriales-daido-steel-cnes-aeiforos-metal-processing-s-a/) (29.6.2018.)
- [12] Sofilić T., Mladenović A., Sofilić U., Defining of EAF steel slag application possibilities in asphalt mixture production, Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 19 (2011) 148-157
- [13] <http://www.sesi.org/sesi-learning-series-steel-slag-an-economical-sustainable-alternative-to-crushed-stone-and-clean-fill/> (29.6.2018.)
- [14] [https://www.aeiforos.gr/en/ladle\\_furnace\\_slag](https://www.aeiforos.gr/en/ladle_furnace_slag) (29.6.2018.)
- [15] Lučić D., Čeličanske troske iz procesa proizvodnje elektropečnim postupkom kao nusproizvodi, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2017.
- [16] [https://www.researchgate.net/figure/The-basic-oxygen-furnace-process-steps-for-steelmaking-79\\_fig14\\_311178751](https://www.researchgate.net/figure/The-basic-oxygen-furnace-process-steps-for-steelmaking-79_fig14_311178751) (29.6.2018.)
- [17] [http://www.myshared.ru/slide/1342870/`](http://www.myshared.ru/slide/1342870/) (29.6.2018.)
- [18] <https://www.britannica.com/technology/steel/Basic-oxygen-steelmaking#ref622926> (29.6.2018.)
- [19] <https://www.britannica.com/technology/basic-oxygen-process#ref128594> (30.6.2018.)
- [20] [http://www.mineralproducts.org/prod\\_slag03.htm](http://www.mineralproducts.org/prod_slag03.htm) (30.6.2018.)
- [21] [http://www.euroslag.com/products/properties/`](http://www.euroslag.com/products/properties/) (30.6.2018)
- [22] The Institute of Fuel, Waste-heat Recovery. Chapman & Hall, London, 1967, pp. 214-223.
- [23] Tani Y., New Energy Conservation Technologies, Vol. II, ed. J. P. Millhone and E. H. Willis. Springer, Berlin, 1981, pp. 1811-1836.
- [24] Bejan A., Entropy Generation through Heat and Fluid Flow. J. Wiley & Sons, New York, 1982, pp. 1-47.
- [25] Granić G., Antešević S., Energija u Hrvatskoj Godišnji energetski pregled, RH, Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2016.
- [26] Rycroft M., Heat recovery from slag improves energy efficiency of furnaces, Energize (2014) 55-57
- [27] Zhang H., Wang H., Zhu X., Qiu Y-J., Li K., Chen R., Liao Q., A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry, Applied Energy, 112 (2013) 956-966

- [28] Pickering S.J., Hay N., Roylance T.F., Thomas G.H., New process for dry granulation and heat recovery from molten blast-furnace slag, *Ironmaking and Steelmaking*, 12 (1985) 14-21
- [29] Jahanshahi S., Breakthrough and Enabling Technologies for Reducing Waste and Emissions in Iron & Steel Industry while Improving Business Efficiency, FE Tech Conference, 26-27 November 2013.
- [30] Shimizu T., Haga D., Mikami G., Takahashi T., Horinuchi K., Heat recovery from melted blast furnace slag using fluidised bed, The 13th international conference on fluidisation – new paradigm in fluidisation engineering, Referred Proceedings, 2010.
- [31] Maruaoka N., Mizouchi T., Purwanto H., Akiyama T., Feasibility study for recovering waste heat in the steelmaking industry using a chemical recuperator” *ISIJ International*, 44 (2004) 257-262
- [32] Sofilić T., Merle V., Rastovčan-Mioč A., Ćosić M., Sofilić U., Steel slag instead natural aggregate in asphalt mixture, *Archives of metallurgy and materials*, 55 (2010) 657-668
- [33] Proctor D.M., Fehling K.A., Shay E.C., Wittenborn J.L., Green J.J., Avent C., Bigham, M. Connolly R.D., Lee B., Shepker T.O., Zak M.A., Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace and electric arc furnace steel industry slags, *Environmental Science and Technology*, 34 (2000) 1576-1582.

## **ŽIVOTOPIS**

### **OSOBNI PODACI:**

Ime i prezime: Toni Marić

Datum i mjesto rođenja: 29.10.1995, Lubeck, Njemačka

Adresa: Staro Pračno 3. Lijevo odvojak 1, Sisak

Telefon: 091/ 973-5933

E-mail: toni.maric.st@gmail.com

### **OBRAZOVANJE:**

Osnovna škola: Braća Ribar Sisak

Srednja škola: Tehnička škola Sisak, Tehničar za električne strojeve s primijenjenim računalstvom

Sveučilište: Metalurški fakultet Sisak, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija, smjer Industrijska ekologija

### **VJEŠTINE:**

Rad na računalu

Strani jezik: Engleski

Vozačka dozvola B kategorija