Troska iz procesa proizvodnje čelika elektropećnim postupkom kao mineralni agregat u cestogradnji

Selanec, Magdalena

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:115:637628

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB FACULTY OF METALLURGY
SISAK

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Magdalena Selanec

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Magdalena Selanec

TROSKA IZ PROCESA PROIZVODNJE ČELIKA ELEKTROPEĆNIM POSTUPKOM KAO MINERALNI AGREGAT U CESTOGRADNJI

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: Doc. dr. sc. Tahir Sofilić

Članovi ispitnog povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mirko Gojić – predsjednik

Doc. dr. sc. Tahir Sofilić – član

Doc. dr. sc. Ivan Brnardić – član

Doc. dr. sc. Zdenka Zovko Brodarac – zamjenski član

Sisak, rujan 2015.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Tahiru Sofiliću na stručnim savjetima, dragocjenim uputama te pomoći tijekom izrade završnog rada. Hvala mojim roditeljima i bratu na podršci i razumijevanju. Također hvala Igoru na pomoći i podršci.

SADRŽAJ

1.UVOD 1
2. OPĆI DIO 2
2.1. Troske kao proizvodni ostatak metalurških procesa 2
2.1.1. Troske iz proizvodnje sirovog željeza 4
2.2. Čelik i njegova proizvodnja 6
2.2.1. Proizvodnja čelika u kisikovim konvertorima 7
2.2.2. Proizvodnja čelika postupcima pretaljivanja 8
2.2.3. Proizvodnja elektročelika 9
2.3. Proizvodnja čelika u elektrolučnoj peći 9
2.3.1. Ciklus rada elektrolučne peći 11
2.3.2. Utjecaj elektropećnog postupka na okoliš 14
2.4. Elektropećna troska 16
2.4.1. Gospodarenje elektropećnom troskom kao proizvodnim ostatkom 18
2.4.2. Odlaganje elektropećne troske 19
2.5. Uporaba elektropećne troske u cestogradnji 24
3. ZAKLJUČAK 35
4. LITERATURA 36

SAŽETAK

Uporaba proizvodnih otpada i/ili nusproizvoda u građevinskoj industriji, a posebno u cestogradnji, jedan je od čimbenika očuvanja prirodnih neobnovljivih izvora mineralnih agregata i istovremenog sprječavanja neželjenog utjecaja industrijskih procesa na okoliš u kojima ti otpadi i/ili nusproizvodi nastaju.

Tako je posljednjih tridesetak godina u svijetu značajno porasla primjena proizvodnih otpada i/ili nusproizvoda u cestogradnji, posebno u području primjene otpadnih materijala kao što su oštećeni asfaltni slojevi, lomljeni betoni, visokopećne i čeličanske troske, leteći pepeli iz termoenergetskih postrojenja na ugljen i sl.

Među proizvodnim ostatcima metalurške industrije, koji mogu biti razvrstani kao otpadi i/ili nusproizvodi, posebno značajno mjesto zauzimaju troske iz proizvodnje željeza i čelika, koje su od najranije povijesti nalazile svoju ulogu kao sekundarne sirovine i predstavljale nusproizvod procesa u kojima su nastajale u skladu sa suvremenom definicijom ovog pojma. Stoga se posljednjih nekoliko desetljeća intenzivno istražuju sve mogućnosti tzv. bezdeponijskog zbrinjavanja troske na načelima ekonomske isplativosti i ekološke prihvatljivosti.

U ovom radu su prikazani podaci o čeličanskoj trosci, čija se sve šira uporaba u cestogradnji i temelji na njenim fizikalno – kemijskim i mehaničkim karakteristikama. Uz podatke o uporabi ove troske u svjetskoj i u europskoj cestogradnji, prikazani su i podaci o istraživanjima mogućnosti primjene domaće elektropećne troske kao cestograđevnog agregata.

Ključne riječi: troska, proizvodni otpad, nusproizvodi, cestogradnja, agregat

Slag from the EAF process as mineral aggregat in road construction

ABSTRACT

The use of production waste and/or by-products in the construction industry, especially in the road construction, is the one of the factors to preserve the natural non-renewable mineral aggregates, and simultaneously prevent unwanted impacts of industrial processes on the environment in which these wastes and/or by-products are formed.

In the last thirty years the world application of production waste and/or by-products in road construction, especially of waste materials such as damaged asphalt layers, crushed concrete, blast furnace and steel slag, fly ash from coal thermal power plants etc, has been significantly increased.

Among the residues of the production from the metallurgical industry, which can be classified as waste and/or by-products, particularly significant is the slag from iron and steel production, which has seen known as a secondary raw material from the earliest history, and represents a by-product of the process which were created according to the modern definition by this term. Therefore, in the past few decades all possibilities for no-landfill disposal of slag on the principles of economic viability and environmental acceptability have been intensively studied.

This paper presents data of steel slag, which widespread use in road construction based on its physical - chemical and mechanical properties. In addition to the data on the use application of slag in the World and for the European road construction, the data on research possibilities of domestic EAF slag use application as a road construction aggregates are presented.

Key words: slag, production waste, by-products, road construction, aggregate

1. UVOD

Zbog rastućih količina proizvodnog otpada koji nastaje u različitim industrijskim procesima, upravljanje otpadom postalo je jedna od najznačajnijih aktivnosti u području zaštite okoliša. Porast ekološke svijesti, povećanje broja onečišćenih zemljanih površina odlagalištima otpada kao i visoke cijene samog odlaganja, doprinijelo je orijentaciji ka tzv. bezdeponijskom zbrinjavanju otpada što je postalo prioritetnim ciljem svake razvijene zemlje u svijetu. Uporaba proizvodnih ostataka koji se mogu nazivati otpadom ili nusproizvodom, što je uređeno posebnim propisima [1], kao alternativnih sirovina u različitim industrijama i drugim djelatnostima, pa tako i u građevinskoj industriji, bazira se na tehničkim, ekonomskim i ekološkim kriterijima.

U skladu s tim, uporaba proizvodnih otpada i/ili nusproizvoda u građevinskoj industriji, a posebno u cestogradnji, može se promatrati kao čimbenik očuvanja prirodnih neobnovljivih izvora mineralnih agregata i istovremenog sprječavanja neželjenog utjecaja na okoliš svih aktivnosti koje su u svezi s eksploatacijom i prijevozom od izvorišta kamenoloma do mjesta ugradnje. Upravo ovi čimbenici nameću potrebu boljeg razumijevanja ekoloških i ekonomskih aspekata uporabe prirodnih mineralnih sirovina u odnosu na alternativne izvore ovih materijala proizvodnih otpada i/ili nusproizvoda što u mnogome može pomoći unapređenju održivog razvoja u području industrije i to na mjestu nastanka otpada kao i na mjestu njegove upotrebe.

U posljednjih tridesetak godina u svijetu je značajno porasla primjena proizvodnih otpada i/ili nusproizvoda u cestogradnji, posebno u području primjene otpadnih materijala kao što su oštećeni asfaltni slojevi, lomljeni betoni, visokopećne i čeličanske troske, leteći pepeli iz termoenergetskih postrojenja na ugljen i sl. Ovo se može ilustrirati jednim od literaturnih podataka [2], koji govori o 43 tipa sekundarnih sirovina korištenih u cestogradnji od čega je njih 11 proizvodni otpad i/ili nusproizvod, a 7 pripada metalurškoj industriji.

Među proizvodnim ostatcima metalurške industrije, koji mogu biti razvrstani kao otpadi i/ili nusproizvodi, posebno značajno mjesto zauzimaju troske iz proizvodnje željeza i čelika, koje su od najranije povijesti nalazile svoju ulogu kao sekundarne sirovine i predstavljale *nusproizvod* procesa u kojima su nastajale u skladu sa suvremenom definicijom ovog pojma.

S obzirom da ukupna proizvodnja čelika u svijetu, bez obzira na vrstu procesa kojim se čelik proizvodi, ima rastući trend, neophodno je adekvatnu pozornost posvetiti pitanju zbrinjavanja troski kao najzastupljenijem proizvodnom otpadu i/ili nusproizvodu ovih procesa.

Ovdje, svakako, vrlo značajno mjesto, s obzirom na ukupne godišnje količine kao i fizikalno – kemijske karakteristike, zauzima i elektropećna troska. Naime, iako je po svojim fizikalno – kemijskim karakteristikama elektropećna troska svrstana u skupinu neopasnog otpada, te ju je moguće odlagati na za to predviđena odlagališta bez opasnosti po okoliš, to se danas rijetko primjenjuje. Razlozi za to su: visoka cijena odlaganja troske, gubitak mogućih obradivih zemljišnih površina, moguća onečišćenja tla, a posebno važan je i gubitak moguće dobiti od korištenja vrijednih sastojina troske koje se odlaganjem zauvijek gube. Stoga se posljednjih dvadesetak godina intenzivno istražuju sve mogućnosti tzv. bezdeponijskog zbrinjavanja troske na načelima ekonomske isplativosti i ekološke prihvatljivosti. Ova istraživanja i postignuti rezultati doprinijeli su promjeni statusa troske i načina gledanja na trosku kao *otpada* iz metalurških procesa, već se troske općenito, pa tako i elektropećna troska, danas smatraju nusproizvodima koje je moguće uporabiti kao sirovinu ili sirovinski dodatak kako u metalurškoj industriji, tako i u drugim industrijskim granama i šire.

U ovom radu je načinjen pregled rezultata istraživanja upotrebljivosti elektropećne troske iz procesa proizvodnje ugljičnih čelika u cestogradnji i to kao dodatak ili zamjena prirodnim mineralnim agregatima. Posebni naglasak je dan na mogućnosti primjene elektropećne troske u izradi asfaltne mješavine za izradu gornjih potrošnih slojeva na prometnicama.

2. OPĆI DIO

Većina metalurških postrojenja svojim djelovanjem mogu imati izravan štetan utjecaj na okoliš i to emisijama iz svojih procesa, čime se onečišćuju zrak, vode i tlo. Uz onečišćenje zraka i voda, metalurška postrojenja su, posebice u prošlosti, bila veliki izvor onečišćenja tla, koje su opterećivale svojim brojnim opasnim i neopasnim proizvodnim otpadom odlažući ga obično na vlastitim neuređenim odlagalištima u krugu tvornice ili neposrednoj blizini. Najčešće ovako neadekvatno odlagani proizvodni otpad činile su ogromne količine neobrađene troske, iskorištenog vatrostalnog materijala, elektropećne prašine iz dimnih plinova, ogorine, različitih muljeva, itd.

Od ukupne količine svih vrsta proizvodnih ostataka nastalih u metalurškim procesima proizvodnje metala i legura, pa tako i u procesima proizvodnje sirovog željeza i čelika, svakako je po količini najznačajnija troska [3,4].

Kao što je već rečeno, čelik je čvrsta otopina ugljika, mangana, silicija, kroma i niza drugih elemenata u željezu. Neki se elementi uvode u čelik sa ciljem poboljšanja njegovih mehaničkih i fizikalnih svojstava te sprečavanja nastanka različitih nepravilnosti u strukturi (grešaka). Ti elementi su obično: ugljik, mangan, silicij, krom, nikal, volfram, molibden, vanadij i dr. Uz ove elemente, čelik uvijek sadrži i neželjene ili štetne tvari ili primjese kao što su fosfor, sumpor, kisik, vodik i dušik, a koje dolaze iz materijala uloška ili iz okolne atmosfere u procesu taljenja.

Da bi se štetne primjese uklonile, proces taljenja regulira se na način da se u tekućoj kupki u početku odvijaju oksidacijski, a zatim dezoksidacijski procesi. U tim procesima, za vrijeme taljenja, uslijed međusobnog djelovanja kisika iz zraka s metalom, dolazi do oksidacije željeza i drugih elemenata sadržanih u uložnom materijalu: aluminija, silicija, mangana i dr. Oksidi, nastali oksidacijom primjesa, reagiraju s dodacima te tvore trosku koja plivajući na talini, štiti ju od utjecaja atmosfere tj. sprječava apsorpciju plinova (dušika, vodika i kisika). Nakon taljenja tekući metal obično sadrži nedozvoljene količine fosfora i sumpora, pa se i oni uklanjaju prevođenjem u trosku, te na taj način regulira njihov sadržaj u talini u skladu s vrijednostima za danu kvalitetu proizvedenog čelika.

2.1. Troske kao proizvodni ostatak metalurških procesa

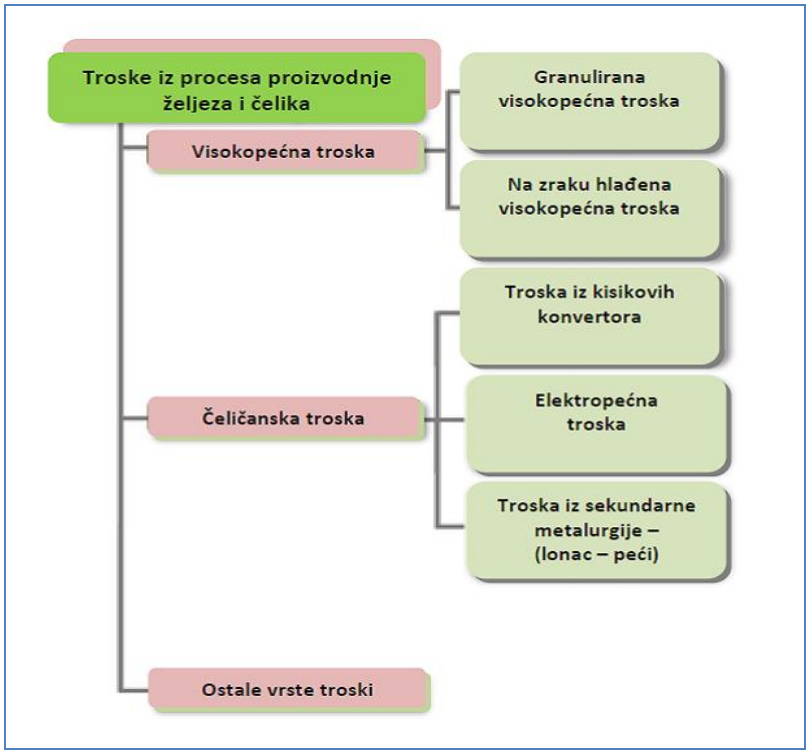
U metalurškim procesima troska nastaje u određenoj fazi procesa rafinacije taline dodavanjem nemetalnih dodataka i talitelja (smjese različitih oksida) kao i međudjelovanjem taline i vatrostalnog materijala kojim je obzidana unutrašnja strana peći [5]. Za vrijeme procesa taljenja ili rafinacije troska *pliva* na površini rastaljenog metala štiteći ga od oksidacijskog ili redukcijskog djelovanja atmosfere držeći ga pri tom čistim (slika 1).



Slika 1. Troska na površini taline u elektrolučnoj peći [6]

Kada se metalurške troske razvrstavaju prema procesima u kojima nastaju, onda se obično razvrstavaju na: *željezne troske*, uključujući visokopećnu trosku i čeličanske troske, *neželjezne troske* nastale pri proizvodnji neželjeznih (lakih i obojenih) metala (Cu, Zn, Pb, Ni, …). Pri ovome se ne smiju zanemariti niti tzv. nemetalurške troske, koje nastaju u *termoenergetskim* postrojenjima, kao i troske nastale u *spalionicama* krutog otpada [6].

U tzv. željezne troske se, s obzirom na mjesto nastanka, uz visokopećne i čeličanske troske, ubrajaju i tzv. ostale troske koje u stvari čine troske nastale u najsuvremenijim postupcima sekundarne metalurgije (slika 2). Naime, s obzirom na povećanu potražnju čelika vrlo visokih kvalitetnih razreda, došlo je do razvoja dodatnih sekundarnih metalurgija koje se odnose na procese odsumporavanja tekućeg čelika, dezoksidacije, odfosforavanje, modifikaciju uključaka itd. [7,8].



Slika 2. Razvrstavanje *željeznih* troski po mjestu nastanka [9]

2.1.1. Troske iz proizvodnje sirovog željeza

Sirovo željezo je u stvari legura željeza s ugljikom i proizvodi se različitim postupcima, od kojih je najstariji i do sada najčešće primjenjivan, postupak u visokim pećima. Naime, proces u visokoj peći je već nekoliko stotina godina najčešće upotrebljavan proces za proizvodnju sirovog željeza, iako se osim ovim postupkom, sirovo željezo proizvodi i drugim postupcima kao što su postupci direktno reduciranog željeza i postupci proizvodnje redukcijskim taljenjem [10].

Sadržaj ugljika u sirovom željezu iznosi od 3,5 do 4,5 mas. %, pa i više [11], zbog čega je vrlo krhko i tvrdo, te se može samo lijevati, a ne može se oblikovati plastičnom deformacijom (kovanjem, valjanjem itd.). Pročišćeno sirovo željezo koje sadrži više od 1,7 mas. %, a manje od 2,5 mas. % ugljika obično se naziva lijevano željezo, a koristi se za izradu masivnijih željeznih odljevaka za razna postolja i nosače.

Kao i u svim drugim metalurškim procesima, tako i u procesu proizvodnje sirovog željeza visokopećnim postupkom (VP), uz željeni proizvod – sirovo željezo, nastaju i proizvodni ostaci u obliku visokopećnog plina, visokopećne prašine i troske, koja je po količini, koja nastaje po toni proizvedenog sirovog željeza najznačajnija i iznosi od 150 – 347 kg/t sirovog željeza [7].

Tekuća VP – troska počinje se formirati već na temperaturama 950 do 1100 °C i naziva se *primarna* troska, da bi se vrlo složenim postupkom transformirala u tzv. konačnu trosku na temperaturama od 1500 do 1550 °C i to nakon završenog niza reakcija u procesu nastajanja sirovog željeza, tj. taljenja svih talitelja, rude, jalovine iz rude i koksa. Sastav VP – troske ovisi o kemijskom sastavu rudne jalovine, količini i vrsti talitelja i drugih dodataka, koksa itd. Glavne komponente VP – troske su CaO, MgO, SiO_2 i Al_2O_3 i čine više od 93 % sastava troske, a ostatak čine FeO, MnO, CaS, itd. S obzirom na njen kemijski sastav, VP – troska se može, na vrlo pojednostavljen način, promatrati kao smjesa oksida koji se razvrstavaju na bazične (CaO, MgO, MnO, FeO, BaO, CrO, Na_2O, i K_2O), kisele (SiO_2, TiO_2, P_2O_5, V_2O_3, WO_3, MoO_3) i amfoterne (Al_2O_3, Fe_2O_3 i Cr_2O_3). Pored oksida koji se u trosci pojavljuju u različitim kombinacijama (silikati, aluminati, feriti, fosfati, itd.), troske znaju sadržavati i sulfide ili neke druge spojeve.

Fizikalne karakteristike VP – troske kao što su njena gustoća, poroznost i krupnoća zrna, određene su vrstom rude korištene u procesu, načinom naknadne obrade i uvjeta hlađenja. Naime, ako se nastala VP – troska nakon ispuštanja iz peći hladi sporo i na zraku, formira se kristalna struktura, pa se često i ta vrsta troske naziva zrakom hlađena ili *kristalna* troska. Ukoliko se tekuća VP – troska brzo hladi velikim količinama vode u tzv. granulatoru, nastaju staklaste amorfne granule, koje predstavljaju i novi proizvod pod nazivom *granulirana* troska (slika 3).

Treću vrstu VP – troske predstavlja *ekspandirana* troska, koja se naziva i *pjenasta* troska, a nastaje hlađenjem rastaljene troske s kontroliranom količinom vode, pri čemu te količine vode moraju biti manje od količine potrebne pri dobivanju *granulirane* troske. Dobiveni produkt je šupljikav, više porozan i mnogo lakši u odnosu na zrakom hlađenu trosku. Variranjem količine vode i kontrolom brzine hlađenja, mogu se različiti proizvodi *pjenaste* troske i to od visoko kristalnih materijala nalik zrakom hlađenoj ili kristalnoj troski pa do staklastih materijala poput granulirane troske.



Slika 3. Visokopećna troska a) zrakom hlađena, b) granulirana i c) ekspandirana [4]

Svaka od navedenih vrsta VP – troski, danas nailazi na široku primjenu u industriji, graditeljstvu, poljoprivredi, itd. (tablica 1) i predstavlja na tržištu zapaženo mjesto kao zamjenski agregat za prirodne mineralne agregate, a interesantna je kako sa ekonomskog, tako i s ekološkog stajališta.

Tablica 1. Neki primjeri uporabe VP – troske u drugim djelatnostima [12]

Visokopećna troska		
Hlađena na zraku	**Granulirana**	**Ekspandirana**
Agregat za asfalt	Cement	Betonska žbuka
Agregat za ceste	Zbijene betone	Laki betoni
Agregat za beton i žbuku	Ceste (posteljice)	Laka punila
Izolacija/Mineralna vuna	Dodatak tlima	Izolacijski materijali
Sirovina za cement	Industrija stakla	Ceste (posteljice)
Dodatak tlima	Sačma za pjeskarenje	÷
Punilo	÷	÷
Agregat za krovove	÷	÷
Agregat za želj. nasipe	÷	÷
Proizvodnja stakla	÷	÷
Pročišćavanje voda	÷	÷

2.2. Čelik i njegova proizvodnja

Danas se godišnje u svijetu proizvede oko 1,65 milijardi tona (2013.), od čega učešće proizvodnje čelika u Europskoj uniji iznosi oko 10% [13], dok su najznačajniji proizvođači čelika u svijetu Kina, SAD, Japan, Rusija, Južna Koreja itd. U razdoblju od 2003. – 2013. godine ukupna proizvodnja čelika u svijetu bilježi porast u proizvodnji, što se može vidjeti u tablici 2, dok je proizvodnja u EU ima opadajući trend, što je posljedica ekonomske recesije u promatranom razdoblju.

Tablica 2. Kretanje ukupne proizvodnje čelika u EU i svijetu [14]

Godina	**Proizvodnja čelika, 10^6t**	
	EU	**Svijet**
2003.	161	968
2004.	203	1063
2005.	196	1148
2006.	207	1250
2007.	210	1348
2008.	199	1343
2009.	139	1238
2010.	173	1433
2011.	178	1537
2012.	169	1560
2013.	166	1649

Zahvaljujući svojim mehaničkim, kemijskim i metalurškim svojstvima, čelik ima višestruku upotrebu, koja prvenstveno proizlazi iz njegovih uporabnih svojstava odnosno mogućnosti postizanja dobre kombinacije čvrstoće, žilavosti, rastezljivosti, oblikovanja deformiranjem, promjene sastava legiranjem, toplinskom obradom itd.

Osnovna svojstva čelika ovise o kemijskom sastavu, mikrostrukturi, te stanju, obliku i dimenzijama gotovog proizvoda. Zbog ekonomičnog načina proizvodnje, u odnosu na druge metalne materijale, te njegovih vrlo povoljnih karakteristika, čelik može poslužiti za raznovrsnu primjenu.

Kao materijal, čelik se koristi u svim granama industrije, prometu, građevinarstvu, poljoprivredi, obrtništvu kao i svim drugim djelatnostima i to s relativno dugim životnim ciklusom (slika 4). S obzirom na tako raširenu upotrebu, industrija čelika je danas vrlo snažna, ostvaruje velike profite i ima vrlo važnu ulogu u globalnoj ekonomiji, a takve činjenice daju za pravo očekivati značajna ulaganja u osuvremenjivanje postrojenja, a time i ekološku prilagodbu. Prethodno navedeno podrazumijeva permanentan razvoj i unapređivanje proizvodnih procesa u smislu ekonomske isplativosti, odnosno racionalnog korištenja energije i sirovina, što izravno ili posredno dovodi i do smanjenja mogućih štetnih utjecaja ovih procesa na okoliš.



Slika 4. Životni ciklus čelika [15]

2.2.1. Proizvodnja čelika u kisikovim konvertorima

Postupak proizvodnje čelika u kisikovim konvertorima je najvažniji postupak izrade čelika jer je od same pojave ovog procesa, ovaj način proizvodnje čelika brzo prihvaćen u cijelom svijetu jer je jeftiniji i učinkovitiji od ostalih, a pokazao se i izuzetno fleksibilan s obzirom na sirovine.

Osnovne sirovine za proizvodnju čelika u kisikovim konvertorima su sirovo željezo iz visoke peći, čelični otpad i/ili neki drugi izvor metala (npr. proizvodi direktne redukcije željeza), Fe – ruda, talitelji, kisik i ferolegure. Primarni cilj pri proizvodnji čelika u kisikovim konvertorima je smanjivanje sadržaja ugljika u rastaljenom sirovom željezu te smanjivanje i kontrola sadržaja sumpora i fosfora [8]. Prema tome, rastaljeno sirovo željezo je primarni izvor željeza, a i energije kod izrade čelika u konvertoru. Sastav rastaljenog sirovog željeza ovisi o načinu rada visoke peći i korištenim sirovinama.

Potrebne količine sirovog željeza, čeličnog otpada, kisika i talitelja ovise o zahtijevanom kemijskom sastavu čelika koji se proizvodi. Energija potrebna za zagrijavanje talitelja čeličnog otpada i sirovog željeza osigurava se oksidacijom brojnih elemenata (Fe, Si, Mn, P i C) u punjenju ili ulošku kisikovog konvertora.

Konvertor je pećno postrojenje obloženo vatrostalnim materijalom i odozgo je otvoreno radi lakšeg ulaganja sirovina, a i izlijevanja gotove čelične taline što se čini nagibanjem konvertora.

Porastom potreba za čelikom, posebno nakon II. svjetskog rata, rasla je i proizvodnja konvertorskog čelika u agregatima čiji se kapacitet kretao od 50 do 500 t. Tijekom 50 – ih godina 20. stoljeća u svijetu se oko 80 % čelika proizvodilo u tzv. *Siemens – Martinovim*

pećima, a ostatak uglavnom u kisikovim, ili *Thomasovim* konvertorima i nešto malo u elektrolučnim pećima. Danas je situacija bitno drugačija. U svijetu udio proizvodnje čelika u kisikovim konvertorima iznosi oko 72% (2013.), dok se u nekim zemljama, koje slove kao veliki svjetski proizvođači čelika, udio konvertorskog postupka u ukupnoj proizvodnji raste, kao npr. u Kini, sa 85% (2003.) taj udio se povećao na 91% (2013.) [14, 16].

2.2.2. Proizvodnja čelika postupcima pretaljivanja

Razvojem suvremene tehnologije rasli su i zahtjevi za plemenitim čelicima specijalnih svojstava, posebice za primjenu u avionskoj i nuklearnoj industriji, medicini, energetici, strojogradnji, itd. Čelici za te namjene trebaju imati nizak sadržaj sumpora i plinova, a moraju biti vrlo homogeni. S obzirom da čelici dobiveni tzv. klasičnim načinima nisu zadovoljavali tražene uvjete, razvijeni su postupci pretaljivanja i taljenja [8] od kojih su najpoznatiji:

- elektropretaljivanje pod troskom,
- pretaljivanje u vakuum – lučnoj peći,
- pretaljivanje u vakuum – indukcijskoj peći,
- pretaljivanje elektronskim mlazom i plazmom,
- najbolji (*best*) postupak pretaljivanja za izradu alatnih čelika.

Postupak elektropretaljivanja pod troskom (EPT) koji je u komercijalnoj primijeni od 1958., na početku se koristio za proizvodnju visokočvrstih niskolegiranih čelika, čelika za ležajeve i alatnih čelika. Danas, ovaj postupak pobuđuje jednak interes stručnjaka posebice u smislu proširenja njegove primjene na izradu nehrđajućih i vatrootpornih čelika, pa se čak može očekivati njegova primjena za proizvodnju plemenitih i ultračvrstih čelika [8].

Postupak vakuumskog pretaljivanja u lučnoj peći (VLP) počeo se primjenjivati u početkom 1950 – ih godina i to za proizvodnju reaktivnih elemenata, kao što su titan (Ti), hafnij (Hf), cirkonij (Zr). Posebna prednost ovog postupka u odnosu na postupak pretaljivanja pod troskom je njegova brzinama taljenja.

Postupak taljenja sličan postupku u vakuum – lučnoj peći je postupak u vakuum indukcijskoj peći (VIP), kod kojeg se za taljenje koristi indukcijsko zagrijavanje. Oba su postupka učinkovita za uklanjanje plinova otopljenih u čeliku, ali su relativno neučinkoviti za uklanjanje nemetalnih uključaka u materijalu.

Postupak pretaljivanja elektronskim snopom je vakumski proces kod kojeg je komercijalna primjena započela krajem 50 – ih i početkom 60 – ih godina prošlog stoljeća, a koristi se za dobivanje visokočvrstih reaktivnih i specijalnih vatrootpornih metala i legura.

Među postupcima proizvodnje čelika pretaljivanjem, treba spomenuti i druge postupke koji su razvijeni u svrhu izrade čelika posebnih karakteristika ili za izradu legura za potrebe svemirske tehnologije i sl. To su npr. postupci poput postupak pretaljivanja s elektronskim mlazom i plazmom te BEST postupak [8].

2.2.3. Proizvodnja elektročelika

Elektročelikom se naziva čelik proizveden u pećima u kojima toplina potrebna za proizvodnju potječe primarno od električne energije. Električna energija se u ovim pećima pretvara na različite načine, pa ovisno o tome razlikujemo *elektrolučne* i *indukcijske* peći. U elektrolučnim pećima (ELP) se proizvodi više od 90% elektročelika.

Razvoj proizvodnje čelika, kao i odabir i primjena pojedinih procesa svake zemlje proizvođača, ovisan je o nizu faktora od kojih su svakako najznačajniji dostupnost i cijena električne energije, kao i o postojanje kvalitetnog ugljena za proizvodnju koksa nužnog u tzv. koksnoj metalurgiji. Elektročelik se u početku koristio primarno za izradu drugih proizvoda (žica, nosači, cijevi dr.), ali je proizvodni asortiman danas proširen i na neke plosnate proizvode (lim, traka) i to uglavnom iz legiranih čelika.

Zbog brojnih prednosti izrade čelika u elektrolučnim pećima, ovaj postupak je vrlo raširen, a njegovo učešće u ukupnoj proizvodnji čelika u svijetu tijekom 2014. godine bilo je gotovo 26%, u EU (28) 39%, dok je u nekim zemljama koje se ubrajaju među velike proizvođače čelika na globalnoj razini, učešće elektropećnog čelika iznosilo 63% (SAD), 70% (Turska), gotovo 73% (Italija) itd.[13].

2.3. Proizvodnja čelika u elektrolučnoj peći

Razvoj proizvodnje čelika, kao i odabir i primjena pojedinih procesa svake zemlje proizvođača, ovisan je o nizu faktora od kojih su svakako najznačajniji dostupnost i cijena električne energije, kao i o postojanje kvalitetnog ugljena za proizvodnju koksa nužnog u tzv. koksnoj metalurgiji.

Najraširenija od svih vrsta peći za proizvodnju čelika je elektrolučna peć koju je na prijelazu 19. na 20. stoljeće izumio francuski kemičar Paul Louis Heroult, a koja je po njemu i dobila naziv *Heroultova elektrolučna peć* [8]. Smatra se da je proizvodnja elektročelika u elektrolučnoj peći započela sto godina nakon otkrića električnog luka, i to puštanjem u rad prve ovakve peći 1906. godine u SAD, a kapacitet joj bio 4 t i luk je proizvodila pomoću dviju elektroda [18]. Iste godine je instalirana prva takva peć i u Njemačkoj, nakon toga i u ostalim zemljama koje su predstavljale značajnije proizvođače čelika, pa je već 1917. godine bilo instalirano više od 730 širom svijeta [8].

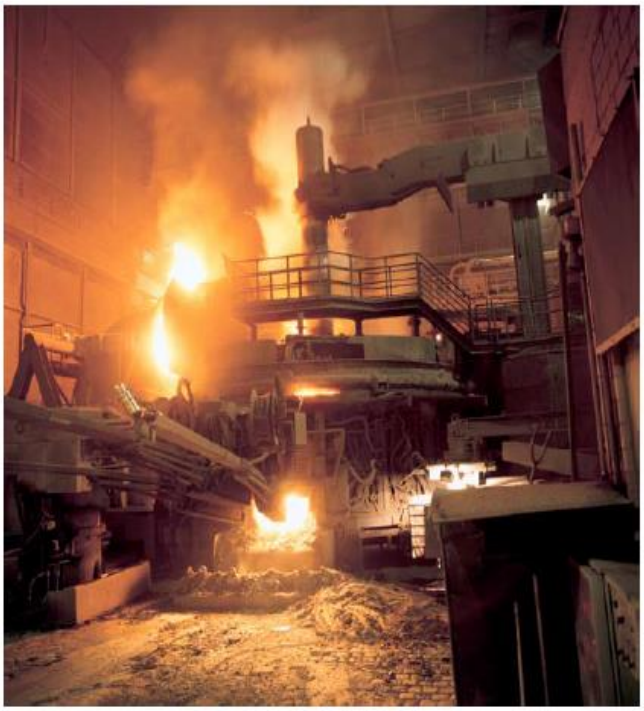
Količine proizvedenog čelika elektropećnim postupkom u ukupnoj proizvodnji u svijetu bilježi lagani porast u razdoblju od 2004. do 2007. i iznose od 355 milijuna tona (2004.) do oko 432 milijuna tona (2007.) kada se učešće ovog postupka počinje smanjivati. U razdoblju od 2008. do 2012. primjećuje se kolebanje vrijednosti učešća količina proizvedenog čelika elektropećnim postupkom u svijetu između 355 i 453 milijuna tona (tablica 3).

Tijekom 2013. učešće elektropećnog postupka u ukupnoj proizvodnji sirovog čelika u svijetu iznosilo je gotovo 27,4%, u Europskoj uniji oko 39,9% (EU-27), ostalim europskim zemljama oko 72-100%, zemljama Sjeverne Amerike 61%, zemljama Južne Amerike 36%, Afrike 67%, Bliskog Istoka 92% itd. [16].

Tablica 3. Kretanje proizvodnje čelika elektropećnim postupkom u EU i svijetu [16,17]

Godina	Proizvodnja čelika ELP, 10^6 t	
	EU	Svijet
2003.	65,2	305
2004.	77,5	359
2005.	75,1	366
2006.	83,3	397
2007.	84,6	432
2008.	82,7	430
2009.	61,2	355
2010.	71,1	421
2011.	75,8	453
2012.	70,3	447
2013.	66,3	452

Danas, jezgru mini-čeličana čine elektrolučne visokoučinske peći (engl. *Ultra High Power, UHP*), koje se odlikuju velikom fleksibilnošću u zadovoljavanju promjenjivih potreba tržišta, ako se raspolaže potrebnom električnom energijom, čeličnim otpadom i nemetalnim dodacima (slika 5).



Slika 5. Elektrolučna peć [15]

Elektropeći se prema veličini, obično dijele na:

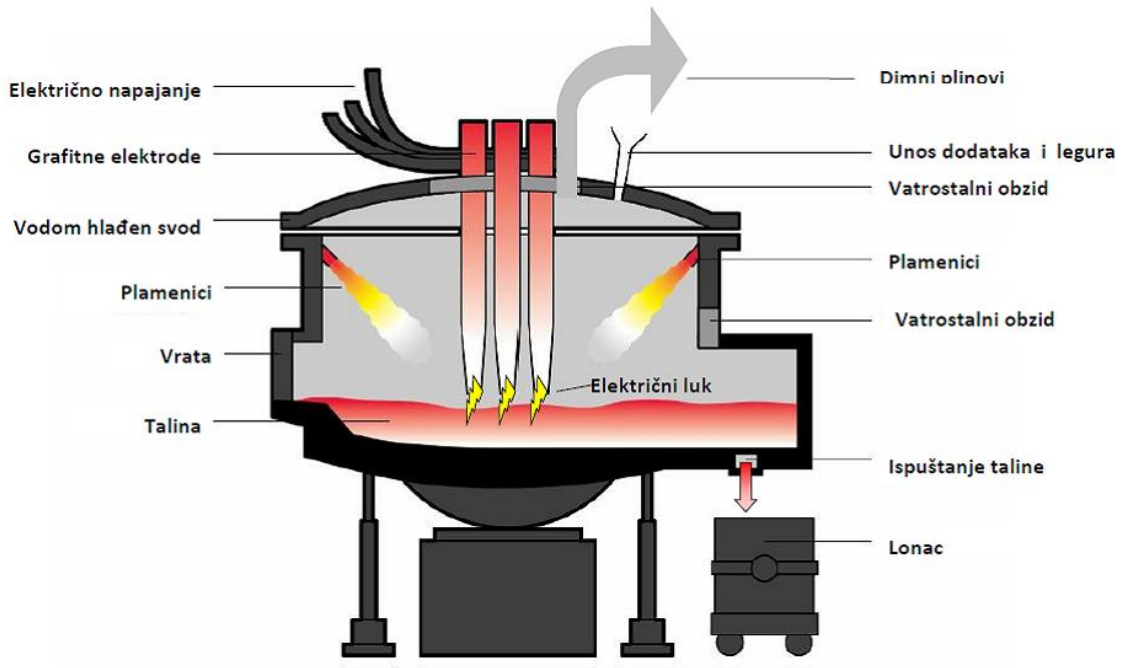
- male elektrolučne peći kapaciteta do 50 tona,
- velike elektrolučne peći kapaciteta od 50 do 100 tona,
- velike elektrolučne peći kapaciteta od 100 do 200 tona.

Suvremene elektrolučne peći uglavnom su kapaciteta do 180 tona, ali su se već odavno počele gradit sve veće peći, jer se potvrdilo da se povećanjem kapaciteta elektrolučnih peći povećava ekonomičnost proizvodnje čelika. Naime, testiranjem je utvrđeno da prijelaz s elektrolučne peći kapaciteta 10 tona, na elektrolučnu peć kapaciteta 30 tona pojeftinjuje proizvodnju čelika za 25%, a prijelaz s elektrolučne peći kapaciteta 30 tona na elektrolučnu peć kapaciteta 70 tona, pojeftinjuje proizvodnja čelika čak za 50%.

2.3.1. Ciklus rada elektrolučne peći

Elektrolučna peć je cilindričnog oblika i sastoji se od podnice, plašta, vodom hlađenog svoda s otvorima za tri elektrode, izljevnog otvora, uređaja za nagibanje (za izljev čelika i ispuštanje troske), uređaja za zakretanje svoda (svod se podiže zajedno s elektrodom i zakreće radi ulaganja), držača elektrode, transformatora i ostale prateće opreme (slika 6).

Podnica peći sastoji se od sferično oblikovane čelične posude s nekoliko slojeva vatrostalnog materijala, a svod peći je sferičnog oblika. Plašt iznad razine troske, kao i svod peći, obično se sastoje od vodom hlađenih panela [8].



Slika 6. Shematski prikaz elektrolučne peći [18]

Postupak proizvodnje čelika elektropećnim postupkom sastoji se od nekoliko osnovnih faza: ulaganje metalnog uloška, taljenja, oksidacija i rafinacija, izlijevanje u lonac. Sirovina za elektropeć je čelični otpad tzv. *staro željezo* i različiti nemetalni dodaci. Za formiranje troske u fazi topljenja uloška koristi se vapno, a kao talitelj, radi sniženja tališta troske, mogu se upotrebljavati različiti nemetalni dodaci (vapno, dolomit, kalcijev fluorit ili sl.).

Ovisno o starosti, cjelokupni elektropećni postupak od punjenja peći uloškom do ispuštanja prvo troske, a onda i čelika, može trajati 3 do 4 sata, za uložak koji je djelomično u tekućem stanju, ili više od 3 sata, pa čak do 7 sati za uložak koji je u cijelosti u krutom stanju [10,12].

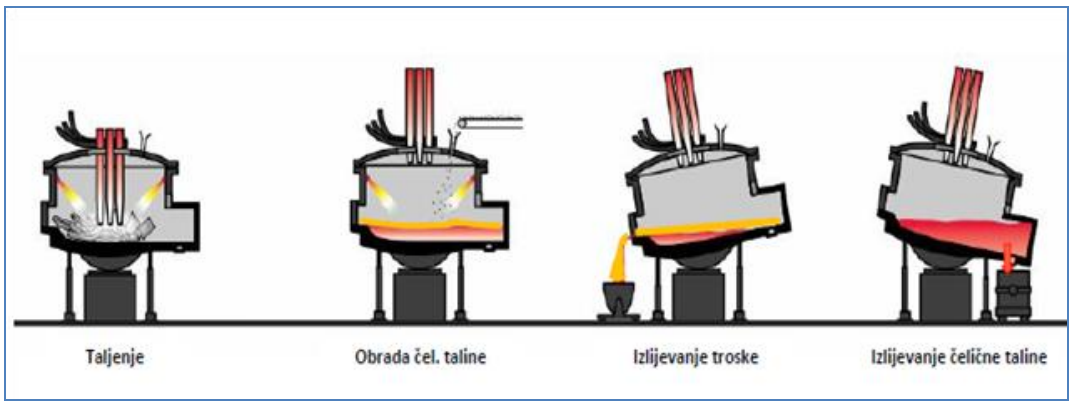
Trajanje samo procesa taljenja uloška u elektrolučnoj peći obično je nešto manje od 1 sata, za uložak koji je djelomično u tekućem stanju, ili nešto više od 1 sata, za uložak koji je u cijelosti u krutom stanju, što je najčešći slučaj.

Osnovna sirovina za proizvodnju čelika u elektrolučnoj peći je čelični otpad čija kvaliteta ima vrlo veliki značaj za uspješnu i ekonomičnu proizvodnju čelika. S obzirom da čelični otpad može sadržavati i neželjene primjese ili onečišćujuće anorganske i organske tvari, njegovoj kontroli se posvećuje velika pozornost. Neke metalne primjese u čeličnom otpadu (npr. Cu, Sn, As) tijekom izrade elektročelika se ne mogu odstraniti, što može ograničavati proizvodni program rada elektrolučne peći.

Pored čeličnog otpada, ponekad se, a ovisno o zahtijevanoj kvaliteti čelika, u uložak dodaje i sirovo željezo, čime se, zbog nižeg sadržaja oligoelemenata, dobiva čelik veće čistoće. Ugljik ima presudnu ulogu pri izradi čelika jer, osim značajnog utjecaja na kvalitetu čelika, utječe i na toplinsku bilancu procesa. Kao talitelj se danas najčešće dodaje vapno, dok je ranije često korišten kalcijev fluorid potisnut iz uporabe zbog ekoloških razloga. Talitelji se u peć mogu dodavati prilikom ulaganja ili izravnim injektiranjem u peć, kao što se injektira tehnički kisik za potrebe oksidacije taline [8].

Proizvedeni čelik se lijeva izravno u ingote ili se postupkom kontinuiranog lijevanja prevodi u okruglice od kojih se prerađuje u konačni proizvod postupkom valjanja, kovanja ili vučenja (lim, traka, cijev, žica).

U ranije korištenim procesima u kojima su se čelici proizvodili na ovaj način, sve faze proizvodnje čelika (predgrijavanje, taljenje, rafinacija i legiranje) odvijale su se u elektrolučnim pećima kao jedinom agregatu (slika 7).



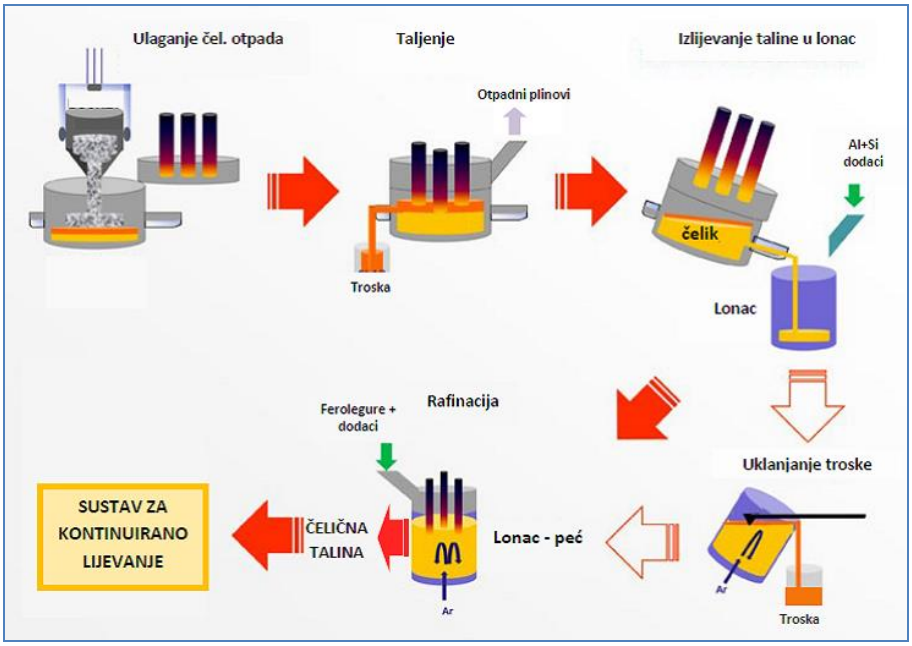
Slika 7. Prikaz pojedinih faza proizvodnje čelika u elektrolučnoj peći [18]

Ukupno vrijeme izrade taline u elektrolučnoj peći trebalo bi biti što kraće, a u kojem bi se od čeličnog otpada uz potrebne dodatke načinila čelična talina.

Izrada svake nove taline počinje ulaganjem osnovnih sirovina, za što je potrebno svod peći i grafitne elektrode podići, kako bi se kranom iznad peći dovele košare pripremljenog čeličnog otpada za ulaganje u peć. Pri tome se dno košare otvara razmicanjem segmenata kako bi se čelični otpad ispustio u peć. Broj košara čeličnog otpada ovisi o volumenu peći i nasipnoj gustoći, iako bi najbolje bilo peć napuniti jednom košarom. Nakon punjenja peći, spušta se svod, a onda se elektrode i električni luk usmjeravaju na uložak, podesi visoki napon i proces taljenja otpočinje [8].

Za taljenje se koriste električna energija (dovodi se putem grafitnih elektroda) i kemijska energija u obliku upuhivanje kisika ili drugog goriva (mješavina plinova) čime se ubrzava taljenje. Do oksidacije Al, Si, Mn, P, C i Fe dolazi kada je kisikovo koplje izravno usmjereno u talinu, pri čemu nastaje toplina za daljnje taljenje. Nastali metalni oksidi prelaze u trosku, a dobiveni plinoviti ugljikov (II) oksid (CO) izlazi iz taline u prazan prostor peći, gdje može dalje izgarati uz dodatno dovođenje kisika. Nakon završetka ukupnog taljenja električno se opterećenje peći smanjuje, a potpunim završetkom taljenja čeličnog otpada dobiva se ravna površina taline čija se temperatura mjeri i uzimaju se uzorci za analizu kemijskog sastava.

Opisani konvencionalni i dugotrajni postupak izrade čelika, gotovo je i nestao, jer je razvojem transformatora velike snage omogućeno brzo taljenje uloška (35-40 min.), pa se sve metalurške aktivnosti koje se mogu provoditi kod manje snage, a zbog boljeg iskorištenja, premještene iz elektropeći u lonac za prijem taline u kojem se obavlja tzv. sekundarna metalurgija (slika 8). Naime, elektrolučna peć se nakon postizanja željenog sastava i temperature taline nagne i čelik se kroz otvor ili žlijeb izlije u lonac tj. lonac-peć i odlazi na daljnju obradu. Pri izlijevanju čelika u lonac-peć, potrebno je spriječiti izlijevanje i troske, jer bi to tijekom naknadnih faza proizvodnje otežalo obradu čelika [8].



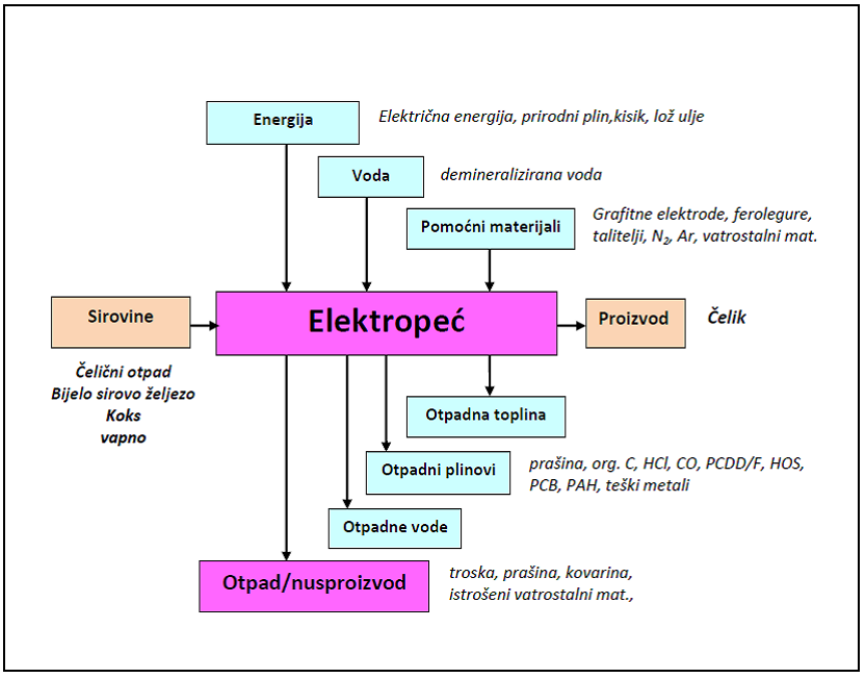
Slika 8. Shematski prikaz pojedinih faza proizvodnje u procesu s lonac – peći [19]

Lonac – peć se obično sastoji od lonca pokrivenog hlađenim svodom i elektrode koja električnim lukom zagrijava čelik i održava temperaturu taline tijekom procesa rafinacije. Rafinacija se provodi dodatkom ferolegura izravno u lonac pomoću kanala u svodu. U lonac-peći provodi se propuhivanje inertnim plinovima (argonom ili dušikom) radi ubrzanja taljenja ferolegura i homogenizacije taline. Istovremeno se dodaje odgovarajuća količina sintetičke troske za pospješivanje odsumporavanja i daljnje rafinacije čelika. Nakon kemijskom analizom provjerene kvalitete čelične taline, talina se odvodi na sustav kontinuirano za lijevanje čelika, a presjek odlivenog čelika može biti pravokutni, kvadratni, okrugli, itd.

Ovom modernizacijom procesa proizvodnje čelika, elektrolučne peći su postale isključivo agregati za pretaljivanje čeličnog otpada, a lonac za prijam tekućeg čelika, kompletiran je svodom, sustavima za dodavanje ferolegura i miješanje argonom, transformiran je u *lonac – peć*, u kojem se, kako je opisano, obavlja rafinacija čelika.

2.3.2. Utjecaj elektropećnog postupka na okoliš

Čeličane kao i većina metalurških postrojenja svojim procesima mogu imati izravan štetan utjecaj na okoliš. Uz emisiju onečišćujućih tvari u zrak, vode i tlo, čeličane opterećuju okoliš svojim proizvodnim ostatcima koji se razvrstavaju na otpad (opasni i neopasni), dok se neki mogu razvrstati i u nusproizvode, ukoliko zadovoljavaju zakonom propisane uvjete (slika 9).



Slika 9. Shematski prikaz tijeka tvari i energije u procesu proizvodnje čelika elektropećnim postupkom [20]

Pri proizvodnji čelika u elektrolučnoj peći (ELP), naročito u fazi taljenja i rafinacije, nastaju relativno velike količine dimnih plinova i prašine koji sadrže krute čestice, metalne okside (prije svega okside željeza, cinka i olova), CO, CO_2, SO_2, NOx, HF, HCl, policikličke aromatske ugljikovodike (PAH), poliklorirane bifenile (PCB), poliklorirane dibenzo–*p*–dioksine i poliklorirane dibenzofurane (PCDD/F), itd. (tablica 3).

Tablica 3. Podaci o emisijskim faktorima onečišćujućih tvari i otpada koji nastaju u procesima proizvodnje čelika u elektropećima instaliranim u EU [7]

Proizvod	**JM**	**Elektropeći u EU**
Čelična talina	kg	1000
Emisija u zrak		
Prašina	g/t čel. taline	4-300
	mg/m^3 otp. plina	0,35-52
Hg	mg/t čel. taline	2-200
Pb		75-2850
Cr		12-2800
Ni		3-2000
Zn		200-24000
Cd		1-148
Cu		11-510
HF		0,04-15000
HCl		800-35250
SO_2	g/t čel. taline	5-210
NO_x		13-460
CO		50-4500
CO_2	kg/t čel. taline	72-180
TOC	g/t čel. taline	35-260
Benzen	mg/t čel. taline	30-4400
Klorobenzeni		0,2-12
PAH		9-970
PCB		0,01-5
PCDD/F	µg I-TEQ/t č. taline	0,04-6
Otpadi/nusproizvodi		
Elektropećna troska	kg/t čel. taline	60-270
Troska iz lonac-peći		10-80
Prašina		10-30
Istrošeni vatrost. materijal		1,6-22,8

Sve navedene onečišćujuće tvari potencijalna su opasnost za okoliš, ukoliko elektropećna postrojenja ne bi imala tzv. okolišnu dozvolu koja njihovu emisiju ograničava na zakonom propisane vrijednosti.

Naime, kao i kod drugih metalurških procesa i elektropećni proces proizvodnje čelika može negativno utjecati na okoliš emisijama u zrak i vode i tlo. Osim neizravnog onečišćenja tla atmosferskom depozicijom onečišćujućih tvari, tlo može biti dodatno opterećeno ukoliko se, u procesu nastali nusproizvodi i/ili otpadi (neobrađena troska, iskorišteni vatrostalni materijal, ogorine, metalne strugotine, različiti muljevi, prašine iz pročistača dimnih plinova, itd.) nekontrolirano odlažu na nezaštićeno okolno zemljište.

Na ovaj način, štetne tvari koje dospiju na tlo, mogu onečistiti tlo mijenjajući mu fizikalno – kemijske značajke (pH, kemijski sastav, kapacitet za vodu, kapacitet za zrak,...), odnosno korisna svojstva i kakvoću, što smatramo njegovim onečišćenjem, ili pak procjeđivanjem kroz tlo štetno utjecati na podzemne vode, pa se to u širem smislu riječi smatra zagađenjem cijelog okoliša.

2.4. Elektropećna troska

Još do prije nekoliko godina, dok su se gotovo svi proizvodni ostaci nazivali otpadom, čeličane su ga uglavnom odlagale na vlastitim neuređenim odlagalištima. Među ovim, ovako neadekvatno odlaganim proizvodnim otpadom, posebno su po količinama značajni, neobrađena elektropećna troska, koja se ponekad naziva i *šljaka*, *zgura*, a ponegdje i *drozga* [21-23], iskorišteni vatrostalni materijal, metalne strugotine, različiti muljevi, prašine iz dimnih plinova, ogorina itd. [3].

Elektropećna troska, koja se danas više ne svrstava u otpad, nego u nusproizvode, a po količinama zauzima vodeće mjestu među svim proizvodnim ostacima ovog procesa, nastaje kao rezultat staljivanja oksida prisutnih u peći, odnosno reakcije oksidacije troskotvornih materijala u peći s oksidnom vatrostalnom oblogom i metalnim primjesama.

Elektropećne troske se uglavnom sastoje od niza oksidnih komponenata i imaju relativno složen kemijski sastav koji ovisi o količini i vrsti troskotvornih materijala korištenih pri izradi taline, kvaliteti upotrijebljenog čeličnog otpada, vrsti i količini dodanih legirnih elemenata i termodinamskih uvjeta, odnosno o tzv. fazi unutar procesa izrade čelične taline (tablica 4).

Tijekom proizvodnje čelika u elektrolučnim pećima nastaje nekoliko tipova troske (slika 9) koje imaju vrlo kompleksnu osnovu, primarno sastavljenu od oksida kalcija, željeza, silicija, aluminija, magnezija, mangana itd., povezanih u složene spojeve kalcijevih silikata, aluminosilikata i aluminoferita.

Pri proizvodnji nehrđajućih čelika, troske mogu sadržavati i legirajuće elemente poput Cr, Ni, V itd., pa te troske pripadaju sustavu poput $CaO – SiO_2 – FeO – Cr_2O_3$ i sl.

Mineraloški sastav elektropećne troske ovisi o samom procesu proizvodnje čelika, a osnovni parametri koji izravno utječu na sastav troske su: kvaliteta proizvedenog čelika odnosno kvaliteta i sastav čeličnog otpada upotrijebljenog kao sirovinska osnova, nemetalni dodaci i njihov maseni udio u šarži elektropeći (vapno, dolomit, boksit, fluorit), upotrijebljene vrste i količine ferolegura (Fe – Mn, Si – Mn, Fe – SI, Fe – Cr,…) kao i ostali tehnološki parametri poput količine dodanog kisika, temperaturni režim peći, način i dinamika odvajanja troske [3].

Tablica 4. Kemijski sastav i uloga troske odnosa CaO/SiO_2 = 2-3,5 iz elektrolučne peći [24]

Kemijski sastav troske (%)	**Karakteristika Troske**	**Uloga troske**
Al_2O_3 = 10-15 FeO = 5-30	oksidacijska	uklanjanje P, S, C, Mn i Si iz metala
Al_2O_3 = 10-15 CaF_2 = 2-5 CaC_2 = 1-5	dezoksidacijska	uklanjanje S

Po svome mineraloškom sastavu čeličanske troske iz procesa proizvodnje nelegiranih čelika, koje se često nazivaju i *crne* troske, predstavljaju mješavinu oksida relativno složenog kemijskog sastava. Uglavnom sadrže okside kalcija i željeza, poslije kojih su po zastupljenosti najznačajniji oksidi magnezija, silicija i aluminija.



Slika 9. Izgled usitnjene elektropećne troske iz procesa proizvodnje ugljičnih čelika ABS čeličane iz Siska (T. Sofilić, 2015.)

Struktura čeličanskih troski temelji se na dvo- i tro-komponentnim sastavima tipa CaO – SiO_2, CaO – FeO, CaO – SiO_2 – MnO, CaO – Al_2O_3, CaO – FeO – SiO_2 i CaO – SiO_2 – FeO – MgO, a najzastupljeniji minerali u troskama su dikalcijevi i trikalcijevi silikati, a pojavljuju se i različiti aluminati i silikati (tablica 5).

Tablica 5. Fazni sastav bazične troske [24]

Faza	Formula	Naziv
Silikati	$CaO \cdot SiO_2$	volastonit
	$CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$	montičelit
	$2CaO \cdot SiO_2$	kalcij ortosilikat
	$2MgO \cdot SiO_2$	forsterit
	$CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$	piroksen i diopsid
	$2MgO \cdot SiO_2 \cdot FeO$	olivin
	$2FeO \cdot SiO_2$	fajalit
Spineli	$MgO \cdot Fe_2O_3$	magnezij ferit
	$MgO \cdot Al_2O_3$	plemeniti spinel
	$2CaO \cdot Fe_2O_3$	dikalcij ferit
	$FeO \cdot Cr_2O_3$	ferokromit
	Fe_3O_4	magnetit
	$MgO \cdot Cr_2O_3$	krom magnezij spinel
Alumosilikati	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$	anortit
	$2CaO \cdot Al_2O_3 \ SiO_2$	dikalcij alumosilikat
Fosfati	$3CaO \cdot P_2O_5$	
	$4CaO \cdot P_2O_5$	
	$3FeO \cdot P_2O_5$	
Sulfidi	CaS	kalcijev sulfid
	MnS	alabandit
	FeS	željezov sulfid
	MgS	magnezijev sulfid
Sulfati	$CaSO_4$	gips
Slobodni oksidi	CaO	vapno
	FeO	vistit
	MnO	manganozit
	MgO	periklas

2.4.1. Gospodarenje elektropećnom troskom kao proizvodnim ostatkom

S obzirom da je u strategiji zaštite okoliša svake suvremene države gospodarenje otpadom određeno kao nacionalni prioritet sa tzv. bez – deponijskim konceptom, to je i u slučaju odabira najpovoljnijih načina gospodarenja troskom kao proizvodnog ostatka i/ili nusproizvoda, nužno istražiti sve mogućnosti njene primjene te u potpunosti napustiti njeno odlaganje na tvorničkim odlagalištima ili odlaganje na tlo općenito. Osnovni preduvjet za promjenu dosadašnje prakse u gospodarenju troskom, je utvrđivanje statusa proizvodnog ostatka odnosno razvrstavanje na nusproizvod i otpad. Na taj način se značajno smanjuje ukupna količina proizvodnog otpada, a njegovo odlaganja na tlo, nakon što se iscrpe sve mogućnosti njegove oporabe, prestalo biti opcijom.

Na taj način se, uz značajno smanjenje površine tla namijenjene odlagalištima troske, istovremeno postiže i ostvaruje tehnološka korist upotrebom ovog proizvodnog ostatka kao nusproizvoda, tj. njegovom uporabom u drugim granama industrije. Ostvaruje se ekonomska dobit zbog smanjenja potrošnje prirodnih materijala i energije kao i sociološko-ekološka dobit zbog unapređenja i implementacije politike održivog razvoja u industriji.

Zbog navedenih razloga kao i zbog relativno velikih troškova, gospodarenje proizvodnim otpadima, pa tako i troskom, uporabom u različitim industrijskim procesima, postala je vrlo značajna u cijelom svijetu, što je i dovelo do intenziviranja istraživanja i razvoja alternativnih rješenja zbrinjavanja troske prevodeći ju u nusproizvod pronalaženjem novih tržišta za takav materijal.

Nadalje, neobnovljivost rezervi mineralnih sirovina korištenih u različitim industrijama, te smanjenje njihove eksploatacije, posebno je značajno sa stajališta održivog razvoja, te nameće potrebu za očuvanjem rezervi mineralnih sirovina i stalnim istraživanjima i otkrivanju novih rezervi, usporedno s trošenjem postojećih. Iz ovih razloga je racionalno crpljenje postojećih izvora i težnja za iznalaženjem novih, temeljna je odrednica ne samo rudarske i geološke struke, već i ostalih struka koje mogu doprinijeti ostvarenju zajedničkog cilja koji se ogleda u zaštiti i gospodarenju mineralnim izvorima, a posebice onih sirovina koje se rabe za izradu građevnih materijala.

Polazeći od važnosti mineralnih sirovina za razvoj ukupnog gospodarstva u svijetu, pa tako i u Republici Hrvatskoj, cijeneći potencijale proizvođača i rastuće potrebe tržišta, bio je nužan sustavan pristup istraživanju alternativnih izvora ovih materijala u cilju stvaranja stabilnog gospodarskog rasta u uvjetima održivog razvoja. Pri tome su troske iz proizvodnje željeza i čelika, od uvijek, zauzimale posebno značajno mjesto.

2.4.2. Odlaganje elektropećne troske

Troska se iz elektrolučne peći izlijeva u lonce s vatrostalnim oblogom, koji mogu biti smješteni na željezničkim vagonima ili cestovnim vozilima (slike 10 i 11), te njima odvozi do mjesta na koje se izlijeva i hladi. To su obično betonirane površine ili bazeni u kojima se hlađenje može provoditi na zraku u atmosferskim uvjetima ili pak ubrzano – hlađenjem vruće troske vodom.



Slika 10. Odvoženje troske do mjesta za hlađenje – željezničkim vagonima [25]



Slika 11. Odvoženje troske do mjesta za hlađenje – kamionima [26]

Brzo hlađenje troske vodom nužno je provoditi ukoliko se troska neposredno nakon hlađenja obrađuje i priprema za uporabu. Brzo hlađenje vodom može se provoditi u bazenima (slika 12), prskalicama na betonskoj podlozi (slika 13), ili provozom vruće troske u demperima kroz vodenu zavjesu. Na ovaj način, hlađenjem i kvašenjem, u trosci se eliminiraju eventualno zaostali slobodni oksidi CaO i MgO, čije bi postojanje moglo umanjiti kvalitetu troske kao materijala namijenjenog graditeljstvu.



Slika 12. Brzo hlađenje troske vodom – u bazenima [27]



Slika 13. Brzo hlađenje troske vodom na betonskoj površini – prskanjem [27]

Naime, u trosci prisutni slobodni CaO u prisutnosti vlage istu veže tvoreći hidroksid, a s CO_2 prisutnim u atmosferi prelazi u karbonat koji ima veći volumen i zbog toga dolazi do *bubrenja* troske. Isto se događa i ukoliko je prisutan slobodni MgO koji na analogan način prelazi u $MgCO_3$. Ova transformacija slobodnih oksida u karbonate, odvija se za vrijeme tzv. *starenja* troske, a koje se obično odvija na odlagalištima gdje je troska izložena atmosferilija pri čemu dolazi do određenih mehaničkih (bubrenje, pucanje, usitnjavanje) i kemijskih (karbonatizacija) promjena u trosci.

Brzo hlađenje vodom je puno brži postupak *starenja* od prirodnog načina na zraku u atmosferskim uvjetima, u kojima se ovaj postupak odvija vrlo sporo i traje od jedne do nekoliko godina.



Slika 14. Odložena elektropećna troska na odlagalištu u krugu ABS čeličane u Sisku [12]

Ohlađena troska, ukoliko se ne prerađuje i ne koristi u metalurškim procesima ili nekim drugim djelatnostima, može se odlagati na odlagališta otpada. Iako se radi obično o trosci koja se, ukoliko nije nusproizvod, može razvrstati u neopasni otpad i odložiti na odgovarajuće odlagalište (slika 14), to nije i najbolje rješenje.

Iako se ovdje radi o neopasnom otpadu i njegovo odlaganje na odgovarajuće odlagalište je moguće, to nije i najbolje rješenje za zbrinjavanje ovog otpada s obzirom na njegova fizikalno – kemijska svojstva koja nam nude niz puno boljih rješenja koja su ekološki prihvatljivija i ekonomski opravdanija.

Trajno odlaganje troske je skupo i zahtijeva veliku površinu, a vrijedne sastojine troske se zauvijek gube. Stoga je neophodno elektropećnu trosku razmotriti kao nusproizvod i ne svrstavati je u proizvodni otpad već detaljno ispitati i u skladu s dobivenim rezultatima primijeniti kao vrijednu sirovinu u metalurgiji čelika ili drugim industrijskim granama.

2.4.3. Primjena elektropećne troske

Od ukupne količine svih vrsta proizvodnih ostataka (otpada i nusproizvoda) nastalih u elektropećnom procesu proizvodnje čelika, svakako je po količini najznačajnija troska, koja nastaje u količini od 60 do 270 kgt^{-1} sirovog čelika [7]. Elektropećna troska se danas u mnogim razvijenim zemljama naziva nusproizvodom, dok se nažalost još uvijek u mnogim zemljama, pa tako i u Hrvatskoj, razvrstava najčešće u neopasni otpad i označava ključnim brojem 10 02 02 [21] iako po svojim karakteristikama i primjenjivosti kako u metalurgiji, tako i u drugim industrijama, opravdano zaslužuje naziv nusproizvod.

Za razliku od troske iz procesa proizvodnje sirovog željeza, čija je tradicija oporabe stara više od 2000 godina, primjena čeličanske troske sve do kraja devedesetih godina prošlog stoljeća nije bila posebno atraktivna, jer su na raspolaganju bile ogromne količine visokopećne troske.

Općenito, čeličanska troska se komercijalno koristi od sredine 19. stoljeća, a početkom 20. stoljeća bilježi se ubrzani razvoj i unapređenje raznih industrijskih proizvodnih procesa u kojima se počinje značajnije koristiti kao sekundarna sirovina. Smanjenjem raspoloživih količina visokopećne troske gašenjem procesa proizvodnje sirovog željeza i porasta proizvodnje čelika elektropećnim postupkom, značaj čeličanske troske je rastao kao i njena primjena u različitim granama industrije i drugih djelatnosti.

U početku, čeličanska troska se koristila za pripravu umjetnog gnojiva i to samo tzv. *Thomasova* troska koja je nastajala u postupku proizvodnje čelika sa visokim sadržajem fosfora. Danas, zbog relativno visokog učešća elektropećnog čelika u ukupnoj količini proizvedenog čelika u svijetu i porasta raspoloživih količina ove vrste otpada, čeličanska troska dobiva sve više na značaju te primjena troske u razvijenom svijetu sve više raste.

Razvoj primjene čeličanske troske usporavao je i u njoj relativno visoki sadržaj zaostalog čelika u obliku kapljica, koji je smetao pri pokušaju uporabe troske u graditeljstvu ili drugim namjenama. U naprednijim tehnologijama proizvodnje čelika, ti sitni dijelovi zaostalog i ohlađenog čelika se, manje-više, izdvajao magnetnom separacijom i vraćao u elektropeć, a troska se uglavnom odlagala na tvornička odlagališta otpada. S obzirom da se ovakvim načinom odlaganja izravno utjecalo na onečišćenje tla i vodnog ekosustava, bilo je nužno, kao i za svaku vrstu otpada, odabrati ispravan način zbrinjavanja čeličanske troske koji se mora provoditi na ekološki prihvatljiv i ekonomski opravdan način.

Stoga danas, zbog relativno visokog učešća elektročelika u ukupnoj količini proizvedenog čelika u svijetu, a otuda i relativno velikih raspoloživih količina ove vrste otpada, te pada raspoloživih količina visokopećne troske zbog smanjene proizvodnje sirovog željeza, čeličanska troska dobiva sve više na značaju i primjena troske u razvijenom svijetu sve više raste (tablica 6).

Tablica 6. Moguća primjena visokopećne i čeličanske troske [28]

Primjena troske	**Područje primjene**				
	Graditeljstvo	**Uređenje odlagališta otpada**	**Održavanje riječnih korita i morske obale**	**Ostala industriia**	**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**	

2.5. Uporaba elektropećne troske u cestogradnji

Uporaba proizvodnih ostataka u cestogradnji, bilo da se radi o otpadu ili nusproizvodima, može se promatrati kao čimbenik očuvanja prirodnih neobnovljivih izvora mineralnih agregata kao i sprječavanje neželjenog utjecaja na okoliš svih aktivnosti koje su povezane na eksploataciju i prijevoz od izvorišta do mjesta ugradnje tih materijala. Upravo ovi čimbenici nameću potrebu boljeg razumijevanja ekoloških i ekonomskih aspekata uporabe prirodnih mineralnih sirovina u odnosu na alternativne izvore ovih materijala – industrijski otpadni materijali i/ili nusproizvodi – što u mnogome može pomoći unapređenju održivog razvoja u području cestogradnje.

Otpadni materijali koji mogu biti interesantni kao zamjena prirodnih mineralnih agregata u cestogradnji, mogu nastati u različitim industrijskim procesima, ali i u samoj građevinskoj djelatnosti, tj. pri rušenju starih građevinskih objekata i pripravi terena za novogradnju. Otpad dobiven na takav način, može se naravno, zbrinjavati trajnim odlaganjem na odlagalištima neopasnog otpada, a može se uporabiti kao sirovina u samom graditeljstvu ili pak u drugim industrijama.

Na temelju podataka iz ranije objavljenih radova [29-32] reciklirani materijali korišteni u graditeljstvu mogu se razvrstati prema njihovom izvoru:

- proizvodni otpad i/ili nusproizvodi (rudarski otpad-jalovina, metalurška troska, ljevaonički pijesak, troska iz TE na ugalj, ugljena prašina, troska iz spalionica komunalnog čvrstog otpada, itd)
- otpad nastao pri popravcima i rekonstrukciji cesta (betonski i asfaltni kolnički materijali),
- građevinski otpad i/ili nusproizvodi (drobljeni beton, opeke, crijep, keramičke pločice, itd.).

Među brojnim proizvodnim otpadima i nusproizvodima, koji su posljednjih tridesetak godina prepoznati kao alternativni sirovinski materijali u cestogradnji, svakako je troska iz proizvodnje željeza i čelika zauzela vrlo značajno mjesto.

2.5.1. Povijest i sadašnje stanje primjene elektropećne troske u cestogradnji

Najraniji zapisi o primjeni troske uopće, datiraju iz doba 350 godina pr.Kr., od grčkog liječnika Aristotela koji je trosku koristio za pripravu lijekova u liječenju rana. Puno mlađi dostupni literaturni podaci govore o njenoj raznolikoj primjeni kroz povijest, pa tako kažu da se u Njemačkoj još 1589. troska koristila pri izradi topovskih kugli, a u Engleskoj se od 1652. koristila u proizvodnji streljiva i grudobrana u rovovima. Primjena troske u industriji cementa počinje u Njemačkoj 1852., a za izradu mineralne vune u Welsu je koriste od 1840. Za izradu ojačanog betona Nijemci su počeli koristiti trosku već 1892., a u Japanu su ju koristili pri izradi opeka već 1901. godine [33-35].

Iako se iz malog broja navedenih primjera vide višestruke mogućnosti uporabe troske, ipak, njena primjena u cestogradnji je najstarija, jer postoje dokazi da uporaba troske u cestogradnji datira iz vremena Rimskog carstva, prije 2000 godina, kada su trosku koristili u osnovnoj konstrukciji za izradu tzv. posteljice [33].

Razvoj primjene troske u cestogradnji novije povijesti, započinje u Engleskoj 1813. godine, kada je prvi puta izgrađena cesta uz uporabu troske, od kada je sve do 1880. godine, troska bila u općoj uporabi za popločavanja ulica u Europi i Sjedinjenim Američkim Državama [36-38].

Zbog činjenice da troska nije prirodni mineral, statistički podaci o njezinoj proizvodnji u svijetu nisu dostupni, pa se godišnje svjetske količine nastale troske procjenjuju na temelju tipičnih odnosa troske i sirovog željeza odnosno čelika [7] u čijim procesima proizvodnje troska i nastaje.

Iako je poznato da se prema važećim EU – referentnim dokumentima za proizvodnju željeza i čelika [7] količine troske nastale u vodećim procesima (po učešću u ukupnoj proizvodnji), kreću od 85 – 165 kg/t čelika za kisikove konvertore i 60 – 270 kg/t čelika za elektrolučnu peć, u literaturi [39, 40] se obično u statističke svrhe koristi podatak od 100 kg/t čelika za količinu troske nastale u odnosu na ukupno proizveden čelik u svim procesima.

Na ovaj način se može prikazati kretanje količina nastale čeličanske troske u svjetskim i europskim razmjerima za razdoblje od 2003. do 2013., ako se u izračun uzme statistički podatak da po toni čelika nastaje 100 kg troske (tablica 7).

Tablica 7. Količina proizvedenog čelika i procijenjene količine nastale troske u svijetu i EU za razdoblje 2003. do 2013. godine [41-51]

Godina	Čelik, $x10^6$ t		Troska, $x10^6$ t	
	Svijet	EU	Svijet	EU
2003.	968	161	97	16
2004.	1063	203	106	20
2005.	1148	196	115	20
2006.	1250	207	125	21
2007.	1348	210	135	21
2008.	1343	199	134	20
2009.	1238	139	124	14
2010.	1433	173	143	17
2011.	1537	178	154	18
2012.	1560	169	156	17
2013.	1649	166	165	17

S obzirom da se udio proizvedenog čelika elektropećnim postupkom u ukupnoj količini proizvedenog čelika za promatrano razdoblje u svijetu kreće od 28% (2013.) do 34% (2004.), a u EU taj udio iznosi od 38% (2013.) do 44% (2009.), srazmjerno tome iznosi i udio elektropećne troske u ukupnoj količini nastalih čeličanskih troski.

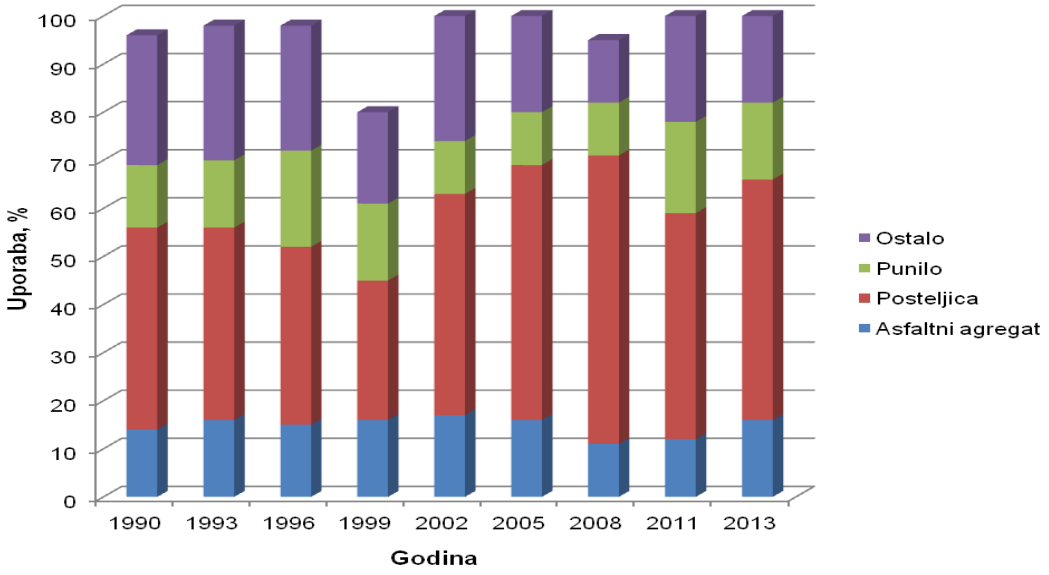
U svrhu dobivanja točnijeg uvida u kretanje količina nastale elektropećne troske, ovdje se može u izračunu primijeniti već ranije navedeni podatak iz EU – referentnih dokumenata za proizvodnju željeza i čelika, o količini troske koja nastaje u elektropećnom procesu, a koja kreće se kreće od 60-270 kg/t čelika (tablica 8).

Tablica 8. Količina proizvedenog čelika elektropećnim postupkom i procijenjene količine nastale elektropećne troske u svijetu i EU od 2003. do 2013. [41-52]

Godina	Čelik, $x10^6$ t		Troska, t (60-270 kg/t) $x10^6$	
	Svijet	EU	Svijet	EU
2003.	305	65	18-82	4-18
2004.	359	78	22-97	5-21
2005.	366	75	22-99	5-20
2006.	397	83	24-107	5-22
2007.	432	85	26-117	5-23
2008.	430	83	26-116	5-22
2009.	355	61	21-96	4-16
2010.	421	71	25-114	4-19
2011.	453	76	27-122	5-21
2012.	447	70	27-121	4-19
2013.	453	63	27-122	4-17

Precizni podaci o količinama nastale troske u svijetu su vrlo rijetki i nisu dostupni, a možda i ne postoje u smislu njihovog sustavnog praćenja kroz duže vremensko razdoblje. Najrazvijenije svjetske države, koje odavno istražuju mogućnosti uporabe troske u raznim industrijskim granama, pa tako i u cestogradnji, dugi niz godina imaju uređen sustav za praćenje podataka o troskama iz proizvodnje željeza i čelika, a među njima prednjače Sjedinjene Američke Države (SAD).

Tako, podaci o uporabi čeličanskih troski u SAD-u mogu poslužiti u svrhu prikaza razvoja primjene troske kao zamjenskog građevnog materijala i njene uporabe u različite svrhe u cestogradnji (asfaltni agregat, posteljica, punilo, ostalo), (slika 15).



Slika 15. Uporaba čeličanske troske u cestogradnji SAD-a u razdoblju 1990.-2013.

Ovi detaljni podaci o količinama nastale troske u SAD-u, količinama izvezene troske iz SAD-a, količinama uvezene troske u SAD za potrebe američke industrije i graditeljstva, kretanje cijena pojedine vrste troske na američkom tržištu, količinama pojedine troske uporabljene za različite namjene, itd., objavljuje *U.S. Geological Survey* (Američki geološki institut) u obliku godišnjih izvješća *Minerals Yearbook – Slag – iron and steel*.

Na ovaj način se došlo do podataka o kretanjima količina uporabljene čeličanske troske na američkom tržištu za različite namjene u cestogradnji, a čime se može ilustrirati razvoj uporabe troske u cestogradnji, koja raste u promatranom razdoblju, pri čemu treba napomenuti da su rezultati istraživanja primjene troske uvjetovali značajnu promjenu glede njene namjene.

Naime, u odnosu na 1978. godinu značajno se promijenila namjena čeličanske troske, pa tako udjel ove troske utrošen za izradu posteljica koji je 1978. godine iznosio 57%, smanjen je 1992. na 35% te 2000. na 33%, dok je udjel namijenjen za izradu asfaltnih agregata porastao od 7% u 1978., na 13% u 1992. odnosno 21% u 2000. godini (tablica 9).

Tablica 9. Kretanje uporaba čeličanske troske u SAD-u [40]

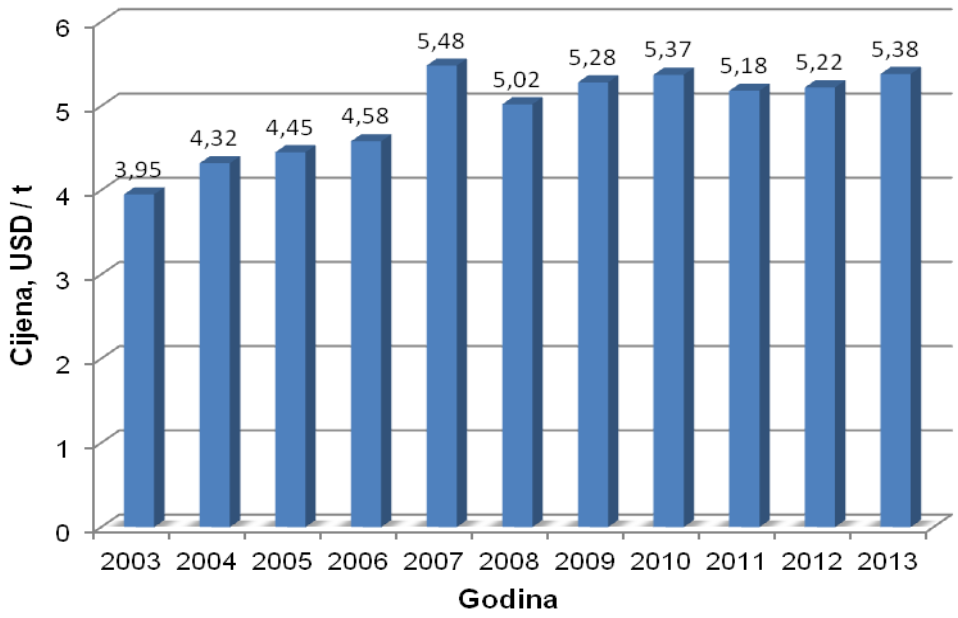
Namjena	**Uporaba troske prema namjeni, %**		
	1978.	**1992.**	**2000.**
Posteljice	57	35	33
Punilo	21	16	19
Asfaltni agregat	7	13	21

Prikazani podaci unutar dvadeset godina prošlog stoljeća na vrlo ilustrativan način govore kako je prvotna uporaba troske kao punila pri izradi običnih kolničkih podloga i posteljica smanjena, jer je opsežnijim istraživanjem fizikalno – kemijskih svojstava ovog materijala utvrđeno, da taj materijal zadovoljava i znatno strože zahtjeve te se može više koristiti, a time postići veću dobit, u izradi asfaltnih mješavina gdje može zamijeniti prirodni kameni agregat.

Interes za uporabom troski na američkom tržištu rastao je iz godine u godinu, što pokazuje i porast količina ukupno upotrijebljenih troski, a posljedično tome rasle su prosječne prodajne cijene troski. Prema statističkim podacima USGS–a, prosječna cijena troski iz proizvodnje željeza i čelika iznosila je od 0,88 USD/t u 1942. godini do 25 USD/t u 2007. godini.

Pri ovom se treba naglasiti da je oduvijek postojala značajna razlika u cijenama između čeličanske i visokopećne troske, koja je postizala cijenu i iznad 100 USD/t [40].

Kako je potražnja za čeličanskom troskom na američkom tržištu rasla, rasla je i njena prosječna cijena. Prosječna cijena čeličanske troske u razdoblju od 2003. do 2013. porasla je za više od 36% i iznosila je od 3,95 do 5,38 USD/t čelika (slika 16).



Slika 16. Prosječne prodajne cijene čeličanske troske u SAD-u od 2003. do 2013. godine

U razdoblju od 2003. do 2013. godine najviše postignuta jedinična cijena čeličanske troske (USD/t) gotovo se učetverostručila (tablica 10). Ovo je bila posljedica s jedne strane smanjenja količina visokopećne troske na tržištu i porasta njene cijene te s druge strane sve veće zaštite neobnovljivih izvora mineralnih sirovina (kamenog agregata), odnosno sve većeg korištenja troske u cestogradnji, koja je i uz porast cijena još uvijek bila jeftinija od kamena.

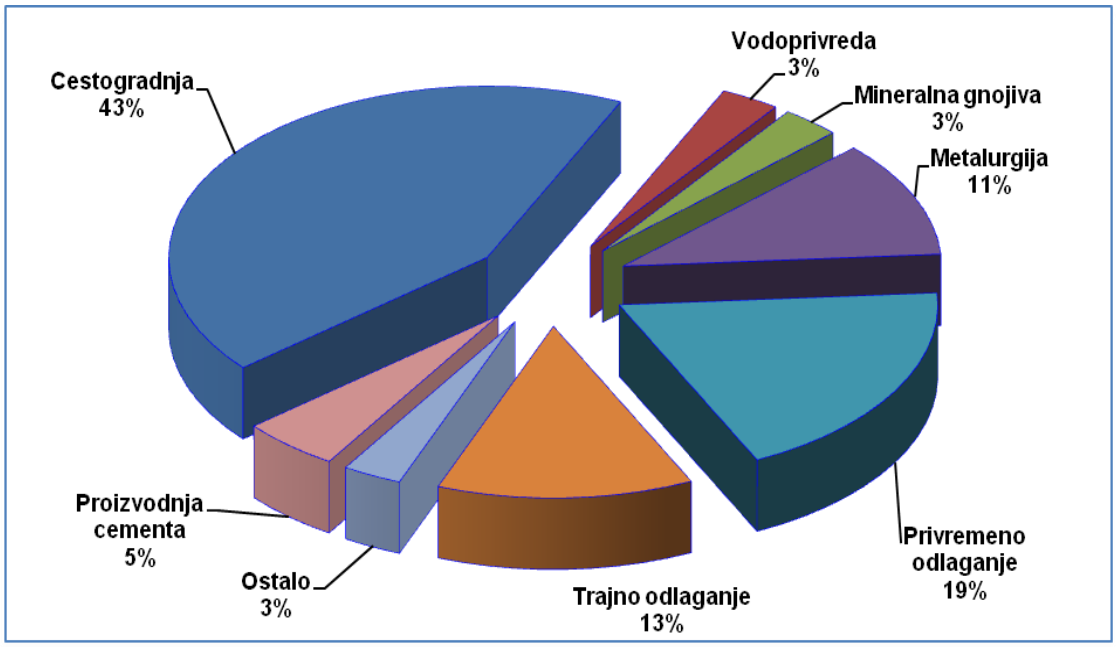
Tablica 10. Ostvarene najniže i najviše prodajne cijene čeličanske troske u SAD-u od 2003. do 2013. godine

Godina	Cijena, USD/t		
	min.	max.	prosječna
2003.	0,73	11,02	3,95
2004.	0,22	7,89	4,32
2005.	0,22	12,85	4,45
2006.	0,49	13,16	4,58
2007.	0,47	11,90	5,48
2008.	0,20	15,39	5,02
2009.	0,19	14,66	5,28
2010.	0,02	24,25	5,37
2011.	0,02	25,53	5,18
2012.	0,25	29,13	5,22
2013.	0,00	32,71	5,38

Podaci o uporabi troske u europskim zemljama su se sustavno počeli prikupljati mnogo kasnije, pa tek od 2000. godine je ustanovljena udruženje proizvođača i obrađivača troske, odnosno europsko udruženje za trosku pod imenom EUROSLAG sa sjedištem u Duisburgu, Njemačka.

Od tada, ovo udruženje, u koje je učlanjeno veliki broj europskih zemalja odnosno njihovi proizvođači željeza i čelika kao i prerađivači troske, svake dvije godine izrađuje Izvješće u kojem se prikazuju prikupljeni rezultati o količinama proizvedenih troski, po vrstama i tipovima, njihova uporaba u različite svrhe i drugi podaci.

Prema posljednjim dostupnim podacima ovog udruženja za čeličansku trosku, tijekom 2012. godine u Europi je nastalo 24,7 milijun tona.



Slika 17. Uporaba čeličanske troske u Europi u 2012. godine (24,7 mil. t)

Na slici 17 je prikazano da je od ukupne količine nastale čeličanske troske, što je iznosilo 24,7 milijun tona, najviše upotrijebljeno za cestogradnju i to 43%, u metalurgiji 11%, cementnoj industriji 5%, vodoprivredi 3%, proizvodnji mineralnih gnojiva 3%, te u ostalim djelatnostima oko 3%. Privremeno je odloženo 19% od nastale troske, za što se može pretpostaviti da čeka na obradu i bit će korisno upotrijebljeno, no nažalost, trajno je odloženo 13% od ukupne količine nastale troske i ta troska se nikada neće iskoristiti, a u njoj vrijedne sastojine su zauvijek izgubljene.

2.5.2. Kriteriji primjenjivosti elektropećne troske u cestogradnji

Još od vremena gradnje najstarije babilonske ceste u III. tisućljeću pr. Kr., vremena gradnje ceste u doba Rimskoga Carstva, pa sve do najsuvremenijih cesta koje se upravo grade, kvaliteta upotrijebljenog građevnog materijala je bila i ostala jedan od najvažnijih čimbenika kvalitete, što potvrđuje i činjenica da su još i danas upotrebljive neke od tih antičkih cesta, zahvaljujući uporabi najkvalitetnijih materijala onoga vremena.

Građevni materijali, koji su se koristili od najranije povijesti graditeljstva, obuhvaćaju sve materijale koji se koriste u građevinarstvu odnosno za izgradnju svih vrsta zgrada, cesta, mostova, tunela, vodovoda, željezničkih pruga, raznih postrojenja za proizvodnju svih dobara i drugoga, a najstariji i najzastupljeniji su kamen, opeka i drvo.

Uz navedene građevne materijale danas se koristi cijeli niz drugih suvremenih materijala, kao što su metali i metalne legure, posebice čelik, staklo, plastika, itd. čemu je pridonio nagli razvoj industrije građevnog materijala u posljednja tri desetljeća.

Kako je opredjeljenje suvremenog čovjeka ka održivom razvoju postala filozofija svakog razvijenog društva, tako i doprinos održivoj gradnji je moguć kroz odabir materijala za građenje, pri čemu vrijedi osnovni koncept da svaki građevni materijal treba imati najmanji mogući utjecaj na okoliš promatrajući njegov životni ciklus sve od uporabe sirovine za proizvodnju pa do konačnog odlaganja. Ovo se posebno odnosi na zaštitu neobnovljivih izvora mineralnih sirovina koji se koriste u graditeljstvu, a od čega posebno značajno mjesto zauzima kameni agregat dobiven iz prirodnih stijena (eruptivne, sedimentne i metamorfne).

Pod pojmom *agregat* obično se podrazumijeva prirodni granulirani materijal koji se upotrebljava u građenju, a nastaje industrijskom preradom uključujući termičku ili drugu obradu.

S obzirom da su potrebe za građevinskim materijalima u svijetu svakim danom sve veće, a čimbenici koje je moguće kontrolirati kako bi se smanjila potreba za prirodnim agregatom ograničeni, potrebno je pronaći alternativne izvore nekih novih agregata. Ovo je doprinijelo razvoju suvremenih tehnika proizvodnje novih agregata recikliranjem građevinskog otpada nastalog rušenjem građevina, preradom troski iz procesa proizvodnje željeza i čelika, industrijski proizvedenih agregata recikliranjem stakla, opeke i sl.

Za svaki od navedenih alternativnih materijala, prije nego što se primjeni u graditeljstvu, potrebno je potvrditi njegovu prikladnost za određenu namjenu.

U cestogradnji su danas još uvijek najčešće zastupljeni agregati prirodnog porijekla, a rjeđe umjetni, reciklirani ili mješavine tih agregata. Agregati su nezaobilazna, uglavnom inertna komponenta ili ispuna mnogih cestograđevnih materijala kao što su betoni, mortovi, asfaltbetoni, bitumenske mješavine za gornje i donje nosive slojeve na autocestama i cestama svih razreda prometnog opterećenja i ostalih radova u gradnji cesta (mehanički zbijeni nosivi sloj tzv. tampon, nasip, posteljica, punilo i sl.).

Uvjeti koji se moraju ispuniti pri odabiru odgovarajućeg agregata za njegovu uporabu u cestogradnji su da pored zastupljenosti u optimalnoj količini agregat ima i odgovarajuću kvalitetu. U ovom slučaju su najvažnija fizikalna svojstva agregata, i to bitni podaci o tome kako će se ponašati u raznim okolnostima, tj. kada se koriste kao tampon ili nosivi sloj, ili kada se ugrađuju u razne slojeve asfaltnih mješavina.

S obzirom da danas prirodne agregate u cestogradnji mogu zamijeniti i agregati priređeni iz proizvodnih ostataka kao što je i čeličanka troska, nužno je poznavati njihov sastav i strukturu kao i sve promjene koje mogu nastupiti u ugrađenim materijalima pod utjecajem okruženja u kojem će se troska naći za vrijeme i posle izgradnje ceste te uvjeta za vrijeme eksploatacije.

Preduvjet za uspješno korištenje čeličanske troske kao agregata kako u cestogradnji, tako i za izradu različitih građevinskih proizvoda je ispunjavanje niza tehničkih i ekoloških zahtjeva danim u harmoniziranim europskim ili nacionalnim standardima.

Počevši u 1990. godini, većina zahtjeva danih u različitim nacionalnim standardima relevantnim za građevinsku industriju usklađeno je i zamijenjeno europskim standardima. Najvažniji europski standardi za današnju uporabu troske u graditeljstvu su prikazani u tablici 11.

Tablica 11. Najvažnije metode ispitivanja agregata izrađenog od čeličanske troske [53]

Vrsta ispitivanja/Norma	**Vrsta ispitivanja/Svojstvo**
HRN EN 206-1:2006	Beton - 1. dio: Specifikacije, svojstva, proizvodnja i sukladnost (uključuje amandmane A1:2004 i A2:2005) (EN 206-1:2000+A1:2004+A2:2005)
HRN EN 1744-1:2012	Ispitivanja kemijskih svojstava agregata - 1. dio: Kemijska analiza (EN 1744-1:2009+A1:2012)
HRN EN 1744-3:2004	Ispitivanja kemijskih svojstava agregata - 3. dio: Priprema eluata izluživanjem agregata (EN 1744-3:2002)
HRN EN 12620:2013	Agregati za beton
HRN EN 13043:2013	Agregati za bitumenske mješavine i površinsku obradu cesta, aerodromskih pista i drugih prometnih površina
HRN EN 13242:2013	Agregati za nevezane i hidraulički vezane materijale za uporabu u građevinarstvu i cestogradnji
HRN EN 13285:2010	Nevezane mješavine
HRN EN 14227-2:2004	Mješavine vezane hidrauličnim vezivom - Specifikacije - 2. dio: Mješavine vezane troskom
HRN EN 14227-12:2007	Mješavine vezane hidrauličnim vezivom -- Specifikacije -- 12. dio: Tlo obrađeno troskom (EN 14227-12:2006)
HRN EN 13282:2013	Hidraulična veziva za ceste - 3. dio: Vrednovanje sukladnosti (EN 13282-3:2013)
HRN EN 933-1:2012	Određivanje granulometrijskog sastava metodom sijanja
HRN EN 933-3:2012	Određivanje oblika zrna – Indeks plosnatosti
HRN EN 933-4:2008	Određivanje oblika zrna – Indeks oblika
HRN EN 933-5:2004	Određivanje drobljenih i lomljenih površina u krupnom agregatu
HRN EN 1097-1:2011	Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata - 1. dio: Određivanje otpornosti na trošenje (micro-Deval)
HRN EN 1097-2:2011	Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata - 2. dio: Metode za određivanje otpornosti na drobljenje
HRN EN 1097-6:2004	Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata - 6. dio: Određivanje gustoće i upijanja vode
HRN EN 1367-1:2008	Ispitivanja toplinskog i vremenskog utjecaja na svojstva agregata - 1. dio: Određivanje otpornosti na zamrzavanje i odmrzavanje
HRN EN 1367-2:2008	Ispitivanje magnezijevim sulfatom

2.5.3. Primjenjivost domaće elektropećne troske u cestogradnji

Hrvatska metalurgija, iako po svome obujmu nije značajna u europskim razmjerima, ima relativno dugu tradiciju upravljanja svojim nusproizvodima, koje je rijetko nazivala proizvodnim otpadom, jer ga je relativno rano počela koristiti kao sirovinu u drugim industrijskim procesima.

U razdoblju od 1959. do 1976. godine u Željezari Sisak se jedino visokopećna troska koristila za izradu tzv. metalurškog cementa od kojeg su se proizvodile opeke tzv. *kvadre* različitih dimenzija. Njihova godišnja proizvodnja iznosila je od početnih 200 000 komada 1959. godine, do preko 3 milijuna komada 1966. da bi prije zatvaranja ove proizvodnje iznosila 500 000 komada 1976. godine [54].

Zbog ekonomskih razloga je 1977. godine obustavljena proizvodnja metalurškog cementa i građevinskih elemenata – opeka, te je zbrinjavanje visokopećne troske nastavljeno prodajom hrvatskim proizvođačima cementa sve do 1991. kada je ugašena proizvodnje sirovog željeza i zaustavljen rad visokih peći. Na ovaj način, je nažalost, zaustavljen i razvoj primjene metalurških troski kao visoko kvalitetnih nusproizvoda u RH.

Do nastavka značajnijih istraživanja u području primjene domaćih metalurških troski, dolazi krajem 2007. godine, kada se u okviru znanstveno-istraživačke djelatnosti tadašnje ABS čeličane u Sisku pristupilo istraživanjima mogućnosti tzv. bezdeponijskog zbrinjavanja čeličanske elektropećne troske [40, 55-68]. U okviru tih istraživanja, ispitane su osnovne fizikalno-kemijske karakteristike čeličanske troske iz elektropećnog procesa proizvodnje ugljičnih čelika u svrhu njene uporabe u drugim granama industrije. Posebna pozornost je posvećena istraživanju mogućnosti uporabe ove troske kao supstituenta prirodnih mineralnih agregata u cestogradnji (slika 18).



Slika 18. Pripremljen agregat od elektropećne troske iz ABS čeličane u Sisku prije rasijavanja u frakcije

Kako je cilj i svrha ovih istraživanja bila utvrditi podobnost elektropećne troske za primjenu u cestogradnji s naglaskom izrade mješavina za asfalt, provedene su i analize koje se obično provode pri ispitivanju fizikalno-kemijskih karakteristika prirodnih mineralnih agregata namijenjenih u istu svrhu.

Dobiveni rezultati ispitivanja mehaničkih i fizičko – kemijskih karakteristika elektropećne troske nastale tijekom procesa proizvodnje ugljičnih čelika u ABS čeličani u

Sisku, a u cilju utvrđivanja podobnosti ovih materijala za djelomičnu ili potpunu zamjenu prirodnih agregata pri izradi mješavina za asfalt, pokazali su da se među najzastupljenijim mineraloškim oblicima nalaze vistit (FeO), dikalcijev i trikalcijev silikat ($2CaO \cdot SiO_2$ i $3CaO \cdot SiO_2$), brownmillerit ($Ca_2(Al,Fe)_2O_5$) i mayenit ($12CaO \cdot 7Al_2O_3$), a analiza zabilježenih difraktograma ukazuje i na mogućnost postojanja faza $CaO \cdot Fe_2O_3$ i $CaO \cdot 2Fe_2O_3$.

Analizirane troske ne sadrže staklastu fazu, pa prema tome nije identificirana prisutnost kromita, a vrlo niski sadržaji CaO ili MgO zadovoljavaju propisane zahtjeve volumne stabilnosti pri ocjeni troske za uporabu u cestogradnji.

Kemijskom analizom je utvrđeno da je CaO u uzorcima troske prisutan u koncentraciji od 33,22 do 38,48 mas. %, Fe_2O_3 24,20 do 29,64 mas. %, SiO_2 10,86 do 11,01 mas. %, MgO 10,22 do 13,09 mas. %, Al_2O_3 1,66 do 8,67 mas. %, MnO 6,18 do 5,47 mas. %, Na_2O 0,02 do 0,07 mas. % i K_2O 0,06 do 0,04 mas. %.

Geometrijska svojstva troske, granulometrijski sastav frakcija, otpornost uzoraka troske na trošenje u mokrom stanju, otpornost na predrobljavanje, vrijednost polirnosti, utvrđene gustoće uzoraka, upijanje vode, prionljivost bitumenskog veziva, itd., pokazali su da ispitivane troske zadovoljavaju svojstva za uporabu u asfaltnim mješavinama.

Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja troske i njihovom usporedbom s rezultatima ispitivanja istih parametara za prirodne agregate, utvrđeno je da u usporedbi s prirodnim eruptivnim agregatima koji se koriste u asfaltnim mješavinama na autocestama i cestama najviših razreda prometnih opterećenja, ispitane troske imaju podjednako dobra svojstva, dok im je otpornost na poliranje znatno bolja u odnose na prirodne eruptivne agregate, te se mogu koristiti u izradi asfaltnih mješavina najviših kvaliteta [62-64, 67-70].

Nakon dobivenih rezultata laboratorijskih istraživanja sisačke elektropećne troske, bilo je potrebno provesti i ispitivanja troske i njenog ponašanja kao agregata ugrađenog u asfalt na cesti, te su istraživanja u tom smjeru i nastavljena.

Stoga se, na temelju dobivenih rezultata ispitivanja fizikalno-kemijskih karakteristika troske, te usporedbe sa vrijednostima za prirodni kamen, čime su osigurani minimalni uvjeti za izradu mješavina troske i prirodnog kamena, pristupilo izradi asfaltnih mješavina u kojima je korišten miješani agregat troska-prirodni kamen i asfaltne mješavine u kojoj je korišten samo prirodni kamen, a dobivene vrijednosti ispitivanih karakteristika su uspoređivane.

Pri projektiranju asfaltne mješavine namijenjene za izradu probnih habajućih asfaltnih slojeva na prometnicama srednjeg prometnog opterećenja (slika 19), izabran asfalt tipa asfaltbeton (AB11).



Slika 19. Nanošenje asfalta izrađenog s agregatom od elektropećne troske [69].

U okviru ovog djela istraživanja izvršeno je i probno asfaltiranje odabranih dionica, pri čemu je postojeći sloj asfalta zamijenjen slojem (40 mm) asfalta tipa AB11 sastava 70% troska (0/4mm, 4/8mm, 8/11mm) i 30% karbonatnog agregata uz bitumen standardne kakvoće. Ovim asfaltom je asfaltirana probna dionica na gradskoj prometnici grada Petrinje koja ima prosječno godišnje prometno opterećenje oko 2000 vozila/dan, a širina probne dionice iznosila je 6m i dužina 200m [64, 67].

Rezultati ispitivanja svih propisanih parametara asfaltne mješavine s elektropećnom troskom uspoređivani su s postavljenim referentnim asfaltnim slojem od 100% prirodnog agregata, u potpunosti su zadovoljili traženim zahtjevima kako neposredno nakon ugradnje, tako i za vrijeme eksploatacije (mjerenja provedena nakon 6 i 12 mj.).

3. ZAKLJUČAK

U ovom preglednom radu je prikazan značaj elektropećne troske i njene mogućnosti glede uporabe u graditeljstvu s posebnim naglaskom na uporabu u cestogradnji. Uz prikaz dugogodišnje prakse korištenja elektropećne troske u svijetu i Europi, dan je i pregled istraživanja upotrebljivosti domaće elektropećne u cestogradnji.

Na temelju literaturnih podataka o rezultatima niza provedenih istraživanja i uspješnosti uporabe elektropećne troske u svijetu, kao i pregleda dosadašnjih rezultata istraživanja domaćih troski u posljednjih nekoliko godina, može se zaključiti kako slijedi:

- Procjenjuje se da je u posljednjih nekoliko godina u svijetu nastalo od 155 do 165 mil. t/god. elektropećne troske, a u europskim zemljama od 17 do 18 mil. t/god., što predstavlja značajan sirovinski potencijal za izradu agregata koji može naći primjenu u cestogradnji i graditeljstvu općenito;
- S obzirom da svojim mehaničkim i fizikalno-kemijskim karakteristikama elektropećna troska u potpunosti ispunjava zahtjeve koje propisuju EU norme za agregate korištene u cestogradnji i graditeljstvu općenito, ova troske se uspješno koristi u europskim zemljama i to u iznosu od 43% (2012. god.) od ukupno nastale količine;
- Prema ostvarenoj proizvodnji čelika u posljednjim godinama u Republici Hrvatskoj, procijenjena godišnja količina čeličanske troske iznosila je od 10.000 do 43.000 t;
- Domaća elektropećna troska (iz čeličana u Sisku i Splitu), koja se uglavnom zbrinjava predajom ovlaštenim sakupljačima, iskorištava se samo djelomično i to na način da se nakon uklanjanja zaostalih primjesa čelika (2-3 %) koristi za nasipanje šumskih putova, zatrpavanje depresija u zemljištu i sl., a dio se odlaže na odlagališta neopasnog otpada ili čak na neuređena tvornička odlagališta u krugu čeličane;
- U posljednjih 10-tak godina istraživane su mehaničke i fizikalno-kemijske karakteristike domaće elektropećne troske u svrhu utvrđivanja njene upotrebljivosti u cestogradnji;
- Dobiveni rezultati su pokazali da domaća elektropećna troska u usporedbi s prirodnim eruptivnim agregatima, koji se koriste u asfaltnim mješavinama na autocestama i cestama najviših razreda prometnih opterećenja, ima jednako dobra fizičko-mehanička svojstva, a neka od svojstava su i znatno bolja;
- Imajući u vidu mnogo veće količine troske koje će ubuduće nastajati u hrvatskim čeličanama, od čega će se samo u Sisku količina elektropećne troske kretati oko 60.000 t/god., neophodno je pokrenuti i provesti postupak pri Ministarstvu zaštite okoliša i prirode, promjenu njenog statusa iz *neopasni proizvodni otpad* u *nusproizvod*.
- Hrvatski proizvođači čelika, trebali bi promijeniti dosadašnji način gospodarenja elektropećnom troskom i poduzeti potrebne mjere u smjeru instalacije potrebne opreme za njenu doradu i pripravu agregata za uporabu u graditeljstvu, a posebno u cestogradnji za izradu asfaltnih mješavina.

4. LITERATURA

1. Pravilnik o nusproizvodima i ukidanju statusa otpada (NN br. 117/14).
2. Nehdi, M. Ternary and quaternary cements for sustainable development, Concrete International 23, 4 (2001) 35-41.
3. Sofilić, T., Mladenovič, A., Sofilić, U., Defining of EAF steel slag application possibilities in asphalt mixture production, Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, **19**, 2 (2011)148-157.
4. http://www.voestalpine.com/stahl/en/Products/Products/Metallurgical-materials/Slag-products (12.7.2015.).
5. Sofilić, U., Komparativna istraživanja procesa usitnjavanja elektropećne troske i dolomita, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstav i tehnologije, 2010.
6. http://www.france-metallurgie.com/wp-content/Vega-tata-steel.jpg (10.7.2015.)
7. Remus, R., Aguado-Monsonet, M. A., Roudier, S., Delgado Sancho, L., JRC Reference Report, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control), EUR 25521 EN, European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau, Seville, Spain, 2013., dostupno na: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/IS_Adopted_03_2012.pdf (12.7.2015.).
8. Gojić, M., Metalurgija čelika, Denona d.o.o., Zagreb, 2005.
9. http://www.euroslag.com/products/statistics/2012/ (20.7.2015.)
10. Glavaš, Z., Dolić, N., Metalurgija željeza, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2014.
11. Božić, B., Metalurgija gvožđa, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1973.
12. Sofilić, T., Brnardić, I., Gospodarenje otpadom, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2013
13. World Steel in Figures 2015, World Steel Association, Brussels, Belgium, 2015. dostupno na: file:///J:/WorldSteelFigures2015.pdf (20.7.2015.)
14. Steel Statistic Yearbook 2004, International Iron and Steel Institute, Committee on Economic Studies, Brusseles, 2004, Belgium.
15. http://www.amaxglobal.com/services.htm (12.7.2015.)
16. Steel Statistic Yearbook 2014, International Iron and Steel Institute, Committee on Economic Studies, Brusseles, 2014, Belgium.
17. http://www.britannica.com/technology/electric-furnace (7.7.2015.).
18. http://tehnologicaland.blogspot.com/2010/11/steelmaking.html (12.7.2015.)
19. http://www.olifer.com/en/steelmaking.php (12.7.2015.)
20. Sofilić, T., Onečišćenje i zaštita tla, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški Fakultet, Sisak, 2014.
21. Uredba o kategorijama, vrstama i klasifikaciji otpada s katalogom otpada i listom opasnog otpada (NN br. 50/05, 39/09).
22. Maruthachalam, V., Palanisamy, M., Beton visokih uporabnih svojstava sa čeličanskom zgurom kao agregatom, Građevinar **66**, 7 (2014) 605-612.
23. http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=62469 (20.7.2015.)
24. Rastovčan – Mioč, A., Efekti aktivacije troske elektropeći, Disertacija, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, 1996.
25. http://www.viktormacha.com/klicova-slova/dk-recycling-slag-pouring-67.html (21.7.2015.)
26. http://www.loesche.com/en/industries/mining-industry/steel-slag-mills/ (21.7.2015.)

27. file:///C:/Users/Zola/Downloads/Mladenovic%20-%20Agregat%20iz%20jeklarske%20zlindre%20v%20asfaltnih%20plasteh.pdf (20.7.2015.)
28. Proctor, D.M., Fehling, K.A., Shay, E.C., Wittenborn, J.L., Green, J.J., Avent, C., Bigham, R. D., Connoly, M., Lee, B., Shepker, T.O., Zak, M.A., Physical and Chemical Characteristics of Blast Furnace, Basic Oxigen Furnace and Electric Arc Furnace Steel Industry Slags, Environ. Sci. Technol. **34** (2000) 1576-1582.
29. http://data.abacus.hr/h-a-d/radovi_s_kongresa/nagoya_japan_2010/90199.pdf (18.8.2015.)
30. Herrington, P.R., Kvatch, I., O'Halloran, K., Assessing the environmental effects of new and recycled materials in road construction: proposed guidelines, Transfund New Zealand Research Report, 306 (2006) 12-15.
31. Mroueh, U.M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction, Waste Manage, **21**, 3 (2001) 271-277.
32. Carpenter, A.C., Gardner, K.H.: Use of Industrial By-Products in Urban Roadway Infrastructure Argument for Increased Industrial Ecology, Journal of Industrial Ecology, **13**, (2009) 6, 965-977.
33. Lang, E., Blastfurnace cements u Barnes, P., Bensted, J., Structure and Performance of Cements, 2nd Edition, Taylor & Francis e-Library, London, England, 2008., str. 310.
34. Lewis, *D.W.*, Properties and Uses of Iron and Steel Slag**.** *1984.* NATIONAL SLAG ASSOCIATION, MF 182-6**.** http://www.nationalslag.org/sites/nationalslag/files/documents/nsa_1826_properties_and_uses_slag.pdf (18.8.2015.)
35. Emery, J., Steel Slag Utilization in Asphalt Mixes. 1984. NATIONAL SLAG ASSOCIATION, MF 186-1**.** http://www.nationalslag.org/sites/nationalslag/files/documents/nsa_186-1_steel_slag_utilization_in_asphalt_mixes.pdf (18.8.2015.)
36. http://www.euroslag.com/products/history/ (18.8.2015.)
37. ASA Quarterly Association Connections. Iron and steel–slags rediscovered resources. 2007. 5(2):1.
38. Mihok, L., Demeter, P., Baricova, D., Seilerova, K., Utilization of ironmaking and steel making slags. Metalurgija **45**, 3 (2006)163-168.
39. Skuza, Z., Kolmasiak, C., Prusak, R.: Posibilities for the Utilization of Metallurgical Slag in the Conditions of the Polish Economy, Metalurgija, 48(2009)2, 125-128.
40. Sofilić, T., Sofilić, U., Brnardić, I., The signification of iron and steel slag as by-product for utilization in road construction, 12th International Foundrymen Conference, Proceedings book, Dolić N., Glavaš Z., Zovko Brodarac Z. Eds., 419-436, Opatija, Croatia 2012.
41. http://www.issb.co.uk/eu28.html#CSP (19.8.2015.)
42. Steel Statistic Yearbook 2005, International Iron and Steel Institute, Committee on Economic Studies, Brusseles, 2005, Belgium.
43. Steel Statistic Yearbook 2006, International Iron and Steel Institute, Committee on Economic Studies, Brusseles, 2006, Belgium.
44. Steel Statistic Yearbook 2007, International Iron and Steel Institute, Committee on Economic Studies, Brusseles, 2007, Belgium.
45. Steel Statistic Yearbook 2008, International Iron and Steel Institute, Committee on Economic Studies, Brusseles, 2008, Belgium.
46. Steel Statistic Yearbook 2009, International Iron and Steel Institute, Committee on Economic Studies, Brusseles, 2009, Belgium.

47. Steel Statistic Yearbook 2010, International Iron and Steel Institute, Committee on Economic Studies, Brusseles, 2010, Belgium.
48. Steel Statistic Yearbook 2011, International Iron and Steel Institute, Committee on Economic Studies, Brusseles, 2011, Belgium.
49. Steel Statistic Yearbook 2012, International Iron and Steel Institute, Committee on Economic Studies, Brusseles, 2012, Belgium.
50. Steel Statistic Yearbook 2013, International Iron and Steel Institute, Committee on Economic Studies, Brusseles, 2013, Belgium.
51. Steel Statistic Yearbook 2014, International Iron and Steel Institute, Committee on Economic Studies, Brusseles, 2014, Belgium.
52. Worldsteel Association, Steel Statistic Yearbook 2014, Worldsteel Committee on Economic Studies, Brusseles, 2014, Belgium.
53. http://www.euroslag.org/status-of-slag/european-standards-technical-guides/ (23.8.2015.)
54. Čepo, Z., Željezara Sisak 1938-1978, Ed.: SOUR MK-ŽS, Sisak, 1978, str. 284.
55. Sofilić, T., Barišić, D.. Sofilić, U. Monitoring of Radionuclides in Carbon Steel Blooms Produced by EAF Process. J. Min. Metall. Sect. B-Metall. **47**, 2(2011)125-136.
56. Sofilić, T.,Mladenovič, A., Sofilić, U., Defining of EAF steel slag application possibilities in asphalt mixture production Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 19, 2 (2011)148-157.
57. Sofilić, T., Barišić, D., Sofilić, U., Đuroković, M. Radioactivity of Some Building and Raw Materials in Croatia. Polish Journal of Chemical Technology, **13**, 3 (2011) 23-27.
58. Sofilić, T., Barišić, D., Sofilić, U., Natural Radioactivity in Steel Slag Aggregate**.** Archives of metallurgy and materials, **56**, 3 (2011) 628-634.
59. Sofilić, T., Barišić, D., Rastovčan Mioč, A., Sofilić, U., Radionuclides in Steel Slag Intended for Road Construction. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. **284**, 1 (2010) 73-77.
60. 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**, 3 (2010) 657-668.
61. Sofilić, T., Mladenovič, A., Sofilić, U. Defining of EAF Steel Slag Application Posibilities in Asphalt Mixture Production**.** Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. **19**, 2 (2011) 148-157.
62. Sofilić, T.,; Ćosić, M., Mladenovič, A., Asi, M. I., Sofilić, U., Čeličanska elektropećna troska umjesto prirodnog mineralnog agregata u asfaltnom habajućem sloju, Ljevarstvo, **53**, 3/4 (2011) 71-76.
63. Sofilić, T., Mladenović, A., Oreščanin, V., Barišić, D., Characterization of ladle furnace slag from the carbon steel production, Proceedings Book of the 13th International Foundrymen Conference—Innovative Foundry Processes and Materials, Opatija, Z. Glavaš, Z. Brodarac, and N. Dolić, Eds., pp. 354–369, Faculty of Metallurgy, Opatija, Croatia, 2013.
64. Sofilić, T., Barišić, D., Sofilić, U., Steel slag radioactivity as a signivicant factor for its use in construction industry, 3rd International Symposium on Environmental Management; Toward Sustainable Technologies, N. Koprivanac, H. Kušić, A. Lončarić-Božić, Eds., pp. 254–261, Faculty of Chemical Engineering and Technology, Zagreb, Croatia, 2011.
65. Sofilić, T., Asi, M. I., Ćosić, M., Sofilić, U., Utilization of Steel Slag as Alternative Aggregate in Asphalt Wearing Cours, Proceedings Book of the 11th International

Foundrymen Conference-Foundry Industry – Significance and Future Challenges, F. Unkić, Eds.; pp. 378-389. Opatija, Croatia, 2011.
66. Sofilić, T., Rastovčan-Mioč, A., Ćosić, M., Merle, V., Mioč, B., Sofilić, U., EAF Steel Slag Application Posibilities in Croatian Asphalt Mixture Production, 4th International Conference on Safety & Environment in Process Industry, Florence, 2010, Chemical Engineering Transactions, **19** (2010) 109-115.
67. Sofilić, T., Mladenovič, A., Sofilić, U., Characterization of EAF Steel Slag as Aggregate for Use in Road Construction, 4th International Conference on Safety & Environment in Process Industry, Florence, 2010, Chemical Engineering Transactions, **19** (2010) 117-123.
68. Sofilić, T., Ćosić, M., Mladenovič, A., Sofilić, U., Utilization of EAF Steel Slag as Alternative Aggregate in Road Construction, Proceedings Book of „Utilization of steelmaking slags with by-product recovery“ workshop, Krakow, 2010, Wydawnictwo Naukowe „Akapit“, M. Karbowniczek; W. Slezak, 105-120.
69. Sofilić, T., Rastovčan-Mioč, A., Ćosić, M., Merle, V., Mioč, B., Sofilić, U., Steel Slag Application in Croatian Asphalt Mixture Production, Proceedings of International Scientific Conference, Management of Technology Step to Sustainable Production MOTSP 2010, P. Ćosić, S. Dolinšek, G. Đukić, G. Barić, Rovinj, 2010.

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI:

Ime i prezime: Magdalena Selanec
Datum i mjesto rođenja: 14. ožujak 1991., Sisak
Adresa: Ulica Braće Bobetka 63, 44010 Sisak – Caprag
Telefon: 044/532-157, 099/79-88-550
E-mail: magdalenaselanec@hotmail.com

OBRAZOVANJE:

1997.- 2005. – Osnovna škola „Braća Bobetko“ Sisak
2005.- 2010. – Tehnička škola Sisak, ekološki tehničar
2013.- 2015. – Metalurški fakultet Sisak, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija, smjer Industrijska ekologija

VJEŠTINE:

Rad na računalu
Strani jezik: Engleski
Vozački ispit – B kategorija