

# Proces proizvodnje čelika kao čimbenik onečišćenja okoliša radionuklidima

---

Lukšić, Don Vito

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:323428>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Don Vito Lukšić

ZAVRŠNI RAD

Sisak, srpanj 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Don Vito Lukšić

PROCES PROIZVODNJE ČELIKA KAO ČIMBENIK ONEČIŠĆENJA  
OKOLIŠA RADIONUKLIDIMA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: Izv. prof. dr. sc Ivan Brnardić

Članovi ispitnog povjerenstva:

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

Sisak, srpanj 2018.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Tahiru Sofiliću na pomoći tijekom izrade i pisanja završnog rada.

Također se zahvaljujem izv. prof. dr.sc. Ivanu Brnardiću na savjetima u toku izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj mami i baki na razumijevanju, žrtvama i podršci koju su mi pružale tijekom studija.

## SAŽETAK

Proizvodnja čelika oporabom čeličnog otpada u posljednji 30-tak godina predstavlja vrlo važnu industrijsku djelatnost širom svijeta čemu je doprinijela njena društvena i ekološka korisnost koja se ogleda u čuvanju prirodnih izvora željezne rude i štednji energije. Međutim, istovremeno je u ovoj djelatnosti zabilježen veći broj nesretnih slučajeva uzrokovanih pojavom radioaktivnih tvari u čeličnom otpadu namijenjenom recikliranju. Posljedice tih nezgoda bile su vrlo ozbiljne s obzirom na zaštitu ljudskog zdravlja i okoliša od štetnih učinaka ionizirajućeg zračenja, a jednako tako i sa gospodarskog stajališta.

U ovom radu je ukazano na razloge i potrebu uvođenja sustava za nadzor i praćenje radionuklida u čeličanama i ljevaonicama, čime bi se unaprijedio sustav upravljanja kvalitetom i okolišem bez kojeg se ne može zamisliti niti jedan suvremeni proizvođač čelika i čeličnih odljevaka. Izgradnja monitoring sustava za nadzor radionuklida u proizvodnim procesima čeličana i ljevaonica istovremeno predstavlja jamstvo konkurentnosti njihovih proizvoda na europskom i svjetskom tržištu koja su sve zahtjevnija glede kvalitete ovih proizvoda i sve češće se zahtjeva certifikat o sadržaju radionuklida.

U radu su prikazani osnovni tipovi sustava za nadzor i praćenje radionuklida, najčešći zahtjevi koje trebaju ispunjavati ovakvi uređaji, te tijek provedbe mjerenja i dojavljivanja pri monitoringu radionuklida u čeličnom otpadu. Istovremeno je ukazano i na potrebu za monitoringom radionuklida u gotovim proizvodima čeličana, kao i stanje monitoringa radionuklida u hrvatskim čeličanama.

**Ključne riječi:** čelik, čelični otpad, radioaktivnost, radionuklidi

# **The steel production process as a factor of environmental pollution by radionuclides**

## **ABSTRACT**

The steel production by recovery of steel scrap in the last 30 years is a very important industrial activity worldwide, which has contributed to its social and ecological utility, which is reflected in the preservation of natural sources of iron ore and energy saving. However, at the same time, a number of incidents have been reported in this activity, caused by the occurrence of radioactive substances in steel scrap intended for recycling. The consequences of these incidents were very serious in terms of protecting human health and the environment from the harmful effects of ionizing radiation, as well as from an economic point of view.

This paper presents the reasons and the need to introducing radionuclide monitoring in steel mills to improve the quality and environmental management system without which no modern steel manufacturer can be imagined. The construction of a monitoring system for radionuclide in steel mills processes in the same time represents a guarantee of the competitiveness of their products on the European and world market which is increasingly demanding on the quality of these products and increasingly requires a certificate of radionuclide content.

This paper presents the basic types of radionuclide monitoring systems, the most common requirements to be met by such devices, and the process of measurement and imaging monitoring of radionuclide in steel scrap. At the same time, the need for monitoring of radionuclide in steel products and the status of radionuclide monitoring in Croatian steel mills was also showed.

**Keywords:** steel, steel scrap, radioactivity, radionuclide

# SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆI DIO	2
2.1 Čelični otpad	2
2.2 Specifikacija čeličnog otpada	3
2.3 Potrošnja čeličnog otpada u svijetu i Europi	5
3. RADIOAKTIVNE TVARI U ČELIČNOM OTPADU	7
3.1. Podrijetlo radioaktivnosti u čeličnom otpadu	8
3.2. Sudbina radionuklida u procesu proizvodnje čelika u elektrolučnoj peći	12
3.3. Mjere sprječavanja pojave radionuklida u procesima proizvodnje čelika	15
3.4. Mjere sprječavanja širenja radionuklida iz procesa proizvodnje čelika u okoliš	22
3.4.1. Stanje nadzora radionuklida u Hrvatskim čeličanama	27
4. ZAKLJUČAK	31
5. LITERATURA	33

# 1. UVOD

Čelik je najkorišteniji materijal današnjice i koristi se u gotovo svim područjima tehnike, a njegova je primjena vrlo široka u svim ljudskim djelatnostima, a temelji se na njegovim izvanrednim svojstvima (velika čvrstoća, tvrdoća, toplinska vodljivost, elastičnost, otpornost prema koroziji i toplini, magnetska permeabilnost, toplinska vodljivost i dr.), po kojima se razlikuje od drugih materijala. Svojstva čelika je moguće promijeniti procesima legiranja, površinske obrade (cementiranjem, cijanizacijom, nitriranjem), toplinske obrade (kaljenjem, popuštanjem, žarenjem), hladnim oblikovanjem ili nanošenjem prevlake, pa se na taj način čelik može prilagoditi svakoj vrsti primjene. Čelik se može oblikovati u toplome ili hladnome stanju (valjanjem, prešanjem, kovanjem, rezanjem i slično) [1].

Čelik se danas najčešće proizvodi u kisikovim konvertorima, elektropečima ili postupcima pretaljivanja. Primarne sirovine za proizvodnju čelika su sirovo željezo i produkti procesa direktne redukcije, a kao sekundarna sirovina upotrebljava se čelični otpad koji se zatim koristi u elektropečnom postupku uz uporabu ostalih materijala (ferolegura, talitelja, oksidansa, vatrostalnih materijala i lijevnih prahova). Prema potrebi i zahtjevima elektrolučne peći, čelik se usitnjava rezanjem, sječenjem, drobljenjem ili prešanjem okrupnjuje uz prethodno uklanjanje nepoželjnih primjesa (npr. beton, zemlja, masti, ulja, boje, obojeni metali i sl.).

Upravo zbog korisnih svojstava čelika i njegove široke uporabe, u svijetu se godišnja proizvodnja čelika prema podacima za razdoblje od 2006. do 2016., kretala od 1,25 mlrd tona do preko od 1,67 mlrd tona čelika, a neki od najznačajnijih proizvođača čelika na svijetu su Kina, Japan, Indija, SAD, Rusija i Južna Koreja [2].

Kvaliteta čeličnog otpada, koja je osnovna sirovina za proizvodnju čelika u elektro peći, uvelike utječe na uspješnost i ekonomičnost proizvodnje čelika te se zato posvećuje velika pažnja pri kontroli čeličnog otpada, budući da čelični otpad često može sadržavati neželjene primjese ili onečišćujuće organske i/ili anorganske tvari kao što su As, Cu, ulja, boje itd. Proizvedeni čelik lijeva se izravno u ingote ili se postupkom kontinuiranog lijevanja prevodi u okruglice koje se zatim prerađuju u konačni proizvod valjanjem, vučenjem ili kovanjem.

Potpuno poznavanje fizikalnih i kemijskih svojstava čelika podrazumijeva i poznavanje sadržaja radionuklida u njemu. Poznato je da pojedine primjese iz uložka elektropeći za vrijeme procesa proizvodnje čelika prilikom taljenja i rafinacije potpuno prelaze u trosku (Ca, Al, Si, Ti) ili u otpadni plin (Zn, Cd), a da samo neke djelomično prelaze u trosku (Mn, Cr, S, P) ili pak ostaju u talini (Cu, Ni, Mo, Sn...). Manje je poznato da čelični otpad može sadržavati i primjese iz grupe radioaktivnih metala, i to najčešće  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{241}\text{Am}$ , koji se također sukladno svojim fizikalno-kemijskim svojstvima za vrijeme procesa proizvodnje čelika raspodjeljuju između taline, troske i dimnih plinova.

Radi sagledavanja problema moguće prisutnosti radioaktivnih elemenata u čeličnom otpadu, proizvodnim ostacima te gotovim proizvodima metalurške i metaloprerađivačke industrije, a na temelju iskustva najpoznatijih svjetskih i europskih proizvođača čelika, bilo je nužno i opravdano uvođenje sustava nadzora i kontrole prisutnosti radionuklida u proizvodnim procesima hrvatskih proizvođača čelika.

Svrha ovog rada bila je prikazati način utvrđivanja potrebe za uvođenjem sustava nadzora i praćenja prisutnosti radionuklida u procesima proizvodnje čelika u hrvatskim čeličanicama, kako bi se unaprijedio sustav upravljanja kvalitetom i okolišem bez kojeg se ne može zamisliti niti jedan suvremeni proizvođač čelika.



## 2. OPĆI DIO

Definicija čelika se mijenjala tokom vremena, no Europske norme ga definiraju kao željezni materijal pogodan za toplinsku obradu čija se svojstva mijenjaju s udjelom ugljika. Stoga se čelik može definirati kao deformabilna legura željeza sa sadržajem ugljika do 2,014% te može sadržavati i druge korisne metale (Cr, Ni, Mo itd.) ili primjese koje su štetne (S, P) te oligoelemente (Cu, Sn, As itd.) i plinove (O, N, H). Oligoelementi i plinovi pogoršavaju svojstva čelika koja uglavnom ovise o udjelima pratećih elemenata te odnosu između željeza, pratećih i legirajućih elemenata. Svojstva čelika ovise i o mikrostrukturi, obliku, stanju i dimenzijama gotovog proizvoda, no ipak, primaran utjecaj na svojstva čelika ima sadržaj ugljika, čijim se porastom smanjuje sposobnost čelika za plastičnu deformaciju i zavarljivost, dok prokaljivost raste [1]. Najvažnija svojstva čelika su njegova čvrstoća, žilavost, rastezljivost, mogućnost promjene sastava legiranjem te mogućnost oblikovanja deformiranjem i toplinskom obradom.

### 2.1. Čelični otpad

Čelični otpad koji se koristi za potrebe proizvodnje čelika elektropećnim postupkom u čeličanicama i ljevaonicama čeličnih odljevaka obično je vlastiti tehnološki otpad tj. povrat iz tehnološkog procesa i čelični otpad nabavljen na tržištu. Stoga se čelični otpad prema podrijetlu dijeli na[1]:

- vlastiti (tvornički) otpad koji nastaje prilikom izrade i prerade čelika, relativno je čist, poznatog kemijskog sastava i lako se reciklira;
- procesni (novi) otpad koji potječe od mehaničke obrade tijekom izrade čeličnih proizvoda, koristan je za recikliranje nakon sortiranja i pripreme i
- stari (amortizirani) otpad koji se sastoji od čeličnih proizvoda na kraju životnog vijeka, otpad najslabije kakvoće.

Na tržištu se pojavljuje čelični otpad kojeg ovlaštene sakupljači kontinuirano prikupljaju od vlasnika otpada kod kojih je ta vrsta otpada i nastala, razvrstavaju ga i potom stavljaju na tržište u nekoliko kvalitetnih razreda ili klasa. Općenito, čelični otpad se razvrstava prema veličini i debljini komada, izvoru nastajanja, stupnju onečišćenja i potrebnoj pripremi za ulaganje u peć. Priprema čeličnog otpada je veoma složena i uključuje odvajanje opasnih predmeta (npr. akumulator i rezervoar), rezanje ili lomljenje, prešanje, te kombinirano prešanje i rezanje.

Dimenzije pojedinih komada čeličnog otpada određuju njegovu nasipnu težinu/gustoću koja utječe na produktivnost peći, brzinu ulaganja i odgor tijekom procesa taljenja u peći. Poželjno je da uložak za elektrolučnu peć ima nasipnu težinu/gustoću od 1 do 2 t/m<sup>3</sup>, a što se postiže raznim postupcima pripreme kao što su usitnjavanje, rezanje, lomljenje i prešanje. Usitnjavanje otpada se provodi čekićastim lomilicama tzv. *šrederima* kojima se otpad kida na manje komadiće.

U čeličnom otpadu primjese se javljaju uglavnom u tri oblika i to kao primjese u čistom stanju pomiješane sa željeznim komponentama čeličnog otpada koje se mogu odvojiti mehaničkim putem (npr. željezo i bakar u elektromotorima); primjese na površini čeličnog otpada nastale nanošenjem metalnih prevlaka na čeličnim proizvodima (npr. cink od galvaniziranih čeličnih limova) i legirajući elementi prisutni kao otopljeni u volumenu čeličnog otpada (npr. otpad odlegiranih čelika niklom, kromom, molibdenom itd.) [1].

Čistoća otpada utječe na kvalitetu gotovog proizvoda, pa je bitno da otpad ne sadrži znatne količine neželjnih i nemetalnih materijala, poput zemlje, gume, plastike, tkanine, drveta i drugih organskih supstanci. Nepoželjne su veće količine željeznih oksida u bilo kojem obliku, osim hrđe na površini otpada nastale djelovanjem atmosferilija. Komadi otpada ne smiju biti veći od dimenzija cigle, stoga se prije ulaganja u peć provodi usitnjavanje otpada. Čelični otpad također ne smije sadržavati nemetalne materijale poput gume, plastike, betona ili drva.

Otpad koji se nabavlja na tržištu, nabavlja se obično sukladno tzv. tehničkim uvjetima za prijem i pripremu čeličnog otpada kojeg izrađuje svaki proizvođač prema vlastitim kriterijima ili pak prema međunarodnoj specifikaciji poput *European Steel Scrap Specification* [3,4]. Specifikacija čeličnog otpada obično obuhvaća oblik otpada (tračnice, osovine, dijelovi konstrukcija, karoserije automobila, kućanski aparati, limovi), dimenzije pojedinog komada, najveću dopuštenu težinu pojedinog komada, štetne primjese (obojeni metali, polimeri, nemetali) i nasipnu težinu (za usitnjeni otpad – tzv. *šreder*). Osim navedenih zahtjeva ne postoje drugi zahtjevi kojima bi čelični otpad trebao zadovoljavati, a eventualno upozorenje da čelični otpad ne smije sadržavati radioaktivne tvari, više je deklarativne prirode s obzirom da se, do prije nekoliko godina, kontrola prisutnosti radionuklida uglavnom nije provodila niti pri sakupljanju i pripremi čeličnog otpada za isporuku potrošačima, a isto tako niti kod potrošača pri prijemu odnosno uporabi u proizvodnim procesima.

## 2.2. Specifikacija čeličnog otpada

S obzirom na kvalitetu, čelični otpad se prema *European Steel Scrap Specification* [3,4], dijeli u 11 kategorija i to:

### **Stari otpad:**

**E3** (stari čelični otpad, debljine >6 mm, dimenzija koje ne prelaze 1,5 x 0,5 x 0,5 m, pripremljen za izravno ulaganje. Može uključivati cijevi, šuplje profile, ali ne karoserije i kotače automobila. Ne smije sadržavati betonski čelik, bakar, kositar, olovo i njihove legure).

**E1** (stari tanki čelični otpad pretežno manje od 6 mm debljine, veličine ne prelaze 1,5 x 0,5 x 0,5 m pripremljene na način kako bi se osiguralo izravno ulaganje u peć. Može uključivati kotače automobila, ali bez karoserija, te kućanskih aparata. Ne smije sadržavati betonski i šipkasti čelik, strojne dijelove, bakar, kositar, olovo i njihove legure).

### **Novi otpad** - Niži sadržaj primjese (otpada bez metalnih prevlaka):

**E2** (novi proizvodni čelični otpad debljine >3 mm, pripremljen na način da se osigura izravno ulaganje u peć. Čelični otpad mora biti bez metalnih prevlaka, osim ako nije drugačije dogovoreno. Ne smije sadržavati primjese betona i šipki, bakar, kositar, olovo i njihove legure).

**E8** (tanki novi proizvodni čelični otpad pretežito <3 mm debljine, pripremljene na način da se osigura izravno ulaganje u peć. Čelični otpad mora biti bez metalnih prevlaka, osim ako to nije drugačije dogovoreno. Ne smije sadržavati bakar, kositar, olovo i njihove legure, niti trake koje se koriste pri vezivanju – tzv. *signode* radi otklanjanja poteškoća pri ulaganju).

**E6** (novi proizvodni tanki čelični otpadci debljine <3 mm, zbijen ili čvrsto zalijepljen na način da se osigura izravno ulaganje u peć. Čelični otpad mora biti bez metalnih prevlaka, osim ako je to dopušteno zajedničkim dogovorom, te mora biti bez bakra, kositra, olova i njihovih legura).

***Zdrobljeni/usitnjeni otpad ili tzv. šreder otpad:***

**E40** (usitnjeni/isječeni čelični otpad čiji komadi ne prelaze 200 mm u bilo kojem smjeru. Treba biti pripremljen na način da se osigura izravno ulaganje u peć. Otpad mora biti bez prekomjerne vlage, sivog lijeva i otpada od spaljivanja komunalnog otpada. Ne smije sadržavati bakar, kositar, olovo i njihove legure).

***Čelična strugotina:***

**E5H** (homogena strugotina ugljičnih čelika poznatog podrijetla pripremljena za izravno ulaganje. Strugotina ne smije sadržavati neželjezne metale, ogorinu, prašinu od brušenja ili materijala iz kemijske industrije).

**E5M** (pomiješana strugotina ugljičnih čelika pripremljena za izravno ulaganje u peć bez primjesa neželjeznih metala, ogorine, prašine od brušenja ili materijala iz kemijske industrije).

***Laki legirani otpad s visokim sadržajem primjesa:***

**EHRB** (stari ili novi otpad, obično od šipki, dimenzija 1,5 x 0,5 x 0,5 m, pripremljen za izravno ulaganje u peć. Može biti od tzv. *betonskog željeza* i lakih šipki, isječen ili u paketima, bez većih količina betona i drugog građevinskog materijala. Ne smije sadržavati bakar, kositar, olovo i njihove legure).

***Otpad s visokim sadržajem primjesa:***

**EHRM** (stari i novi dijelovi strojeva i komponenti koji nisu navedeni u drugim vrstama otpada, dimenzija 1,5 x 0,5 x 0,5 m. Može sadržavati sivi lijev. Ne smije sadržavati bakar, kositar, olovo i njihove legure, niti strojne dijelove).

***Fragmentirani/usitnjeni otpad iz spalionica komunalnog otpada:***

**E46** (rasuti čelični otpad iz postrojenja za spaljivanje komunalnog otpada izdvojen magnetskom separacijom, dimenzija <200 mm, pripremljen za izravno ulaganje u peć. Bez previše vlage i oksida, te bez bakra, kositra, olova i njihovih legura).

Osim dimenzija pojedinih komada čeličnog otpada koji se ulaže u peć, vrlo važne su i onečišćujuće tvari organskog i anorganskog podrijetla koje u čeličnom otpadu ne smiju biti iznad 1,4% maseni za kategoriju čeličnog otpada označenu kao E1 (laki čelični otpad pripremljen za ulaganje, debljina <6 mm) i EHRB (stari ili novi otpad pripremljen za ulaganje, bez Cu, Sn, Pb i njihovih legura) te 1 % za kategoriju označenu sa E3 (teški otpad pripremljen za ulaganje uključujući cijevi, šuplje profile, bez Cu, Sn, Pb i njihovih legura) [5]. Naime, ove primjese, utječu na kvalitetu čelika izravno (smanjuju mehanička svojstva gotovih čeličnih proizvoda) i neizravno (tijekom lijevanja čelika, završnog žarenja proizvoda). Osim toga, neželjene primjese sudjeluju u reakcijama pirolize i piro sinteze pri čemu nastaju razni spojevi koji mogu biti emitirani u okoliš u obliku dimnih plinova iz elektropeći te ozbiljno ugroziti zdravlje ljudi i ostalog živog svijeta u okolišu.

Zbog sigurnosnih razloga, čelični otpad ne smije sadržavati posude pod tlakom, zatvorene ili nedovoljno otvorene posude, zapaljive i eksplozivne materijale, vatreno oružje, streljivo, te materijale koji sadrže ili emitiraju onečišćujuće tvari koje mogu negativno utjecati

na ljudsko zdravlje, okoliš ili proces proizvodnje čelika. Veoma je važno da otpad ne sadrži radioaktivne materijale, stoga se na ulazu u postrojenje provjerava razina zračenja otpada.

### 2.3. Potrošnja čeličnog otpada u svijetu i Europi

Osnovni proizvodi metalurgije željeza i čelika još uvijek su nezamjenjivi u mnogim granama industrije i njegove svakodnevne potrebe u svijetu rastu. Osim željezne rude, najvažnija sirovina za proizvodnju čelika je čelični otpad (drugi naziv je staro željezo) koji je sastavni dio uloška u svim suvremenim postupcima za proizvodnju čelika. Za različite postupke udjel čeličnog otpada je različit i kreće se od 20 do 100% maseni. Tako je npr. za proizvodnju sirovog čelika u kisikovim konvertorima potrebno osigurati do 20% čeličnog otpada u ulošku, 50% za proizvodnju čelika Siemens - Martenovim postupkom udjel čeličnog otpada u ulošku iznosi 5%, dok taj udjel za proizvodnju čelika u elektropečima iznosi od 90 do 100%.

Čelični otpad koji se koristi za potrebe proizvodnje čelika elektropečnim postupkom u čeličanama obično je vlastiti tehnološki otpad – povrat iz tehnološkog procesa i čelični otpad nabavljen na tržištu. Čelični otpad koji se u obliku tehnološkog otpada vraća u proces proizvodnje najčešće mora zadovoljiti zahtjeve za kemijskim sastavom u propisanim koncentracijskim granicama pojedinih kemijskih elemenata te biti odgovarajućih dimenzija ovisno o zahtjevima otvora elektropeći i načinu ulaganja.

Otpad nabavljen na tržištu, nabavlja se obično sukladno tzv. tehničkim uvjetima za prijem i pripremu čeličnog otpada kojeg izrađuje svaki proizvođač čelika prema vlastitim kriterijima ili prema međunarodnoj specifikaciji *European Steel Scrap Specification* (Poglavlje 2.2.).

Osim navedenih zahtjeva ne postoje drugi zahtjevi kojima bi čelični otpad trebao zadovoljavati, a eventualno upozorenje da čelični otpad ne smije sadržavati radioaktivne tvari je samo deklarativne prirode s obzirom da se kontrola prisutnosti radionuklida uglavnom ne provodi niti pri sakupljanju i pripravi čeličnog otpada za isporuku potrošačima, a isto tako niti kod potrošača pri prijemu odnosno uporabi u proizvodnim procesima.

U posljednjih pet godina (2012.-2016.), količina svjetske proizvodnje sirovog čelika kretala se između 1,56 mlrd tona do više od 1,67 mlrd tona godišnje, a najznačajniji proizvođači čelika bili su Kina, Japan, Indija, SAD, Rusija i Južna Koreja. Imajući u vidu navedene podatke o količini proizvedenog čelika u svijetu, a jednako tako i u Europskoj uniji (EU), lako je zaključiti o količinama čeličnog otpada koje je potrebno osigurati za navedenu proizvodnju čelika. Naime, pođe li se od činjenice da se prema Referentnom dokumentu o najboljim raspoloživim tehnikama zaštite okoliša za proizvodnju željeza i čelika (BREF) [8] po toni proizvedenog čelika elektropečnim postupkom potroši između 1,04 i 1,23 tone čeličnog otpada, a za proizvodnju iste količine čelika u kisikovim konvertorima potroši se između 0,1 i 0,34 tone te godišnja proizvodnja čelika ovim postupcima u svijetu moguće je procijeniti količine godišnje potrošnje čeličnog otpada. Tako je prema literaturnim podacima [7], u razdoblju od 2012. do 2016. proizvedeno između 1,56 i 1,67 mlrd tona sirovog čelika za što je utrošeno od 555 do 585 mln tona čeličnog otpada, tablica 1[7].

Tablica 1. Pregled količina proizvedenog čelika u svijetu i ukupne potrošnje čeličnog otpada (mln tona) u razdoblju 2012.-2016. [7]

	godina				
	2012.	2013.	2014.	2015.	2016.
Proizvodnja sirovog čelika	1560	1650	1670	1615	1630
Ukupno upotrijebljen čelični otpad	570	580	585	555	560
Omjer čelični otpad/sirovi čelik, %	36,5	35,2	35,03	34,37	34,36
Vlastiti otpad (otpad koji kruži)	200	205	207	200	195
Udjel vlastitog otpada u ukupno upotrijebljenom, %	35,1	35,3	35,38	36,04	34,82
Otpad nabavljen za čeličane	370	375	378	355	365
Udjel nabavljenog otpada u ukupno upotrijebljenom, %	64,9	64,7	64,61	63,96	65,18
Novi čelični otpad (procesirani otpad)	120	130	133	130	130
Udjel novog otpadu ukupno nabavljenom otpadu, %	32,4	34,7	35,19	36,62	35,62
Stari čelični otpad (glavni otpad)	250	245	245	225	235
Udjel starog otpadu ukupno nabavljenom otpadu, %	67,6	65,3	64,81	63,38	64,38

U tablici 1 su prikazani i maseni udjeli pojedine vrste čeličnog otpada prema podrijetlu (stari otpad, novi otpad, otpad nabavljen na tržištu i vlastiti otpad iz procesa proizvodnje).

U istom razdoblju se količina proizvedenog sirovog čelika u EU (28) kretala od 168,6 do 169,3mln tona godišnje, a godišnja potrošnja čeličnog otpada se kretala od 88,27 do 94,2 mln tona, tablica 2.

Tablica 2. Pregled količina proizvedenog čelika u EU (28) i količina potrošenog čeličnog otpada (mln tona) u razdoblju 2012.-2016. [7]

	godina				
	2012.	2013.	2014.	2015.	2016.
Proizvodnja sirovog čelika	168,6	166,4	169,3	156,17	162,3
Od čega:					
Udjel sirovog čelika proizvedenog u kisikovim konvertorima, %	58,3	60,2	61,0	60,5	60,3
Udjel sirovog čelika proizvedenog u elektrolučnoj peći, %	41,7	39,6	39,0	39,5	39,7
Ukupno korištenje čeličnog otpada	94,2	90,3	91,6	90,61	88,27
Omjer čelični otpad/sirovi čelik, %	55,9	54,3	54,1	54,5	54,4

Pri ovome je važno napomenuti, a što je također vidljivo iz tablice 2, da je udjel čelika proizvedenog postupkom u elektrolučnoj peći iznosio oko 40% od ukupne godišnje količine proizvedenog čelika, dok je udjel čelika proizvedenog kisikovim konvertorima iznosio oko 60 % od ukupne godišnje količine proizvedenog čelika u EU tijekom promatranog razdoblja.

S obzirom na neizmjenno značenje čeličnog otpada kao sirovine u procesu proizvodnje čelika, od vitalnog je značaja biti potpuno upoznat sa njegovom kvalitetom koja podrazumijeva i prosječni kemijski sastav tj. prisutnost svih, željenih i neželjenih, konstituenata.

Sakupljeni čelični otpad, obično sadrži izvjesne količine nečistoća i oligoelemenata i u izvjesnim granicama njihova prisutnost se može tolerirati. Međutim, ukoliko su neki od tih elemenata prisutni u većim količinama, mogu imati negativan utjecaj na kvalitetu proizvedenog čelika. Tako npr. nikal (Ni), bakar (Cu) i kositar (Sn) sadržani u čeliku u zavisnosti od masenog udjela, mogu utjecati na promjenu njegove mikrostrukture. Bakar (Cu) i kositar (Sn) mogu se koncentrirati iznad maksimalno dozvoljene količine na površini čelika, pa uzrokovati krtost takvog čelika i slabo stanje površine čelika, itd. Neki od oligoelemenata u procesu proizvodnje čelika mogu biti eliminirani kao npr. silicij (Si) i krom (Cr) koji se mogu ukloniti oksidacijom u peći dok nikal (Ni) i molibden (Mo) ostaju u čeliku, povećavajući njegovu tvrdoću i otpornost na udar, ali smanjuju njegovu sposobnost zavarivanja. Arsen (As) i u najmanjim količinama izaziva krtost čelika [9].

Potpuno poznavanje fizikalnih i kemijskih svojstava čeličnog otpada koji kao sirovina u proizvodnim procesima čeličana i ljevaonica ima vrlo veliki značaj, danas, osim poznavanja približnog kemijskog sastava (otpad od ugljičnih čelika, visoko legiranih čelika itd.), podrazumijeva i poznavanje sadržaja spomenutih onečišćujućih metala i nemetala, a u zadnje vrijeme se nameće nužda poznavanja i eventualne prisutnosti radionuklida u čeličnom otpadu.

### **3. RADIOAKTIVNE TVARI U ČELIČNOM OTPADU**

Kako je ranije spomenuto, pojedine primjese iz čeličnog otpada za vrijeme procesa proizvodnje čelika pri taljenju i rafinaciji potpuno prelaze u trosku (Ca, Al, Si, Ti) ili u otpadni plin (Zn, Cd), odnosno neke samo djelomično prelaze u trosku (Mn, Cr, S, P) ili pak.

Radioaktivnost je sposobnost tvari da emitira zračenje i ne ovisi o masi ili volumenu te tvari, već isključivo o broju raspada atoma u jedinici vremena. Svi kemijski elementi rednog broja većeg od 83 su prirodno radioaktivni te se razvrstavaju u tri radioaktivna niza i nazivaju se radionuklidi. Oni nestabilni spontano se raspadaju bez vanjskih utjecaja uz emisiju zračenja koja predstavlja višak energije. Neke lakše jezgre atoma postaju stabilne već nakon jednog raspada, dok teške jezgre nakon jednog ili više raspada još uvijek mogu biti nestabilne.

Vrijeme poluraspada radionuklida je vrijeme potrebno da se polovica radionuklida iz tog uzorka raspadne i ono je karakteristično za svaki određeni radionuklid.

Radioaktivne tvari su prisutne svuda oko nas (a mogu doći iz svemira u obliku zračenja), nalaze se u Zemljinoj kori, pa čak i u hrani i piću, a u okolišu se mogu naći i kao posljedica vrlo široke primjene u svim sferama ljudske djelatnosti, nuklearnih nesreća te ispitivanja i uporabe oružja.

Zbog vrlo široke primjene radioaktivnih elemenata posljednjih 60-tak godina, u industriji, medicini, nuklearnoj tehnici, vojnoj industriji i sl., nastaje i niz odbačenih predmeta s radioaktivnim sadržajem za čijom uporabom je prestala potreba, razvrstavaju se u radioaktivni otpad, a ne rijetko su završavali u čeličnom otpadu namijenjenom obradi u čeličanicama [10-12].

Prema *Zakonu o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti* [13] radioaktivni otpad jest otpadna tvar nastala od iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva te otpadne tvari nastale obavljanjem djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, nuklearnom djelatnošću ili tijekom pogona nuklearnog postrojenja za koju nije predviđena daljnja uporaba, bez obzira na fizički oblik i kemijska svojstva, a koja sadrži radioaktivne tvari čija je aktivnost, koncentracija ili zračenje iznad granice propisane posebnim pravilnikom. Radioaktivnim otpadom se smatraju i otpadne tvari nastale obavljanjem djelatnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada.

Ova vrsta otpada nastaje u mnogim ljudskim djelatnostima i to svugdje gdje radioaktivnost ima primjenu. Kao mjesto nastajanja radioaktivnog otpada posebno je značajna industrija eksploatacije ruda poput iskopavanja, obrade te korištenja ugljena, prirodnog plina i fosfatnih ruda pri čemu nastaju velike količine nisko radioaktivnog otpadnog materijala. U industrijskim postrojenjima se često koriste i detektori dima, gromobrani ili različiti razinomjeri i sl. koji po prestanku korištenja predstavljaju radioaktivni otpad.

U energetici nastaju najveće količine radioaktivnog otpada u nuklearnim elektranama kao i u svim fazama nuklearnog gorivnog ciklusa počevši od kopanja uranske rude do razgradnje nuklearnih postrojenja (rudarenje uranovih ruda, obogaćivanje urana za korištenje u nuklearnim reaktorima, obrade goriva – fisijski produkti koji nastaju u procesu prerade istrošenog nuklearnog goriva, nuklearni otpad nastao tijekom pogona, održavanja i razgradnje nuklearnih elektrana itd.

Radioaktivni otpad može nastati i u medicini (izvori ionizirajućeg zračenja u svrhu dijagnosticiranja i liječenja), u znanstveno-istraživačkoj djelatnosti (otpad koji nastaje pri izvođenju eksperimenata ili kontrolnim laboratorijima u kojima se koriste izvori ionizirajućeg zračenja). Podjela radioaktivnog otpada na vrlo nisko radioaktivni otpad, nisko radioaktivni otpad, srednje radioaktivni otpad i visoko radioaktivni otpad ovisi o vremenu u kojem otpad ostaje radioaktivan, udjelu radioaktivnog materijala u otpadu te o tome stvara li otpad toplinu ili ne.

S obzirom da u ovom radu nije riječ o radioaktivnom otpadu kao takvom i o gospodarenju ovom posebnom vrstom otpada, već samo o pojavi onečišćenosti čeličnog otpada dijelovima nisko i srednje radioaktivnog otpada, nužno je ukazati na moguće izvore i podrijetlo radioaktivnosti u čeličnom otpadu.

### **3.1. Podrijetlo radioaktivnosti u čeličnom otpadu**

Poznato je da recikliranje metala danas predstavlja važnu industrijsku djelatnost širom svijeta, a čemu je doprinijela njena društvena i ekološka korisnost jer čuva prirodne izvore ruda i štedi energiju. Međutim, tijekom posljednjih desetljeća u ovoj djelatnosti je zabilježen veći broj nesretnih slučajeva s radioaktivnim izvorima koji su se nehotice našli u prikupljenom metalnom otpadu namijenjenom recikliranju. Posljedice tih nezgoda bile su vrlo ozbiljne s obzirom na zaštitu ljudi i okoliša od štetnih učinaka ionizirajućeg zračenja, a jednako tako i sa gospodarskog stajališta. Kako je čelik danas najtraženiji reprodukcijски materijal čija je proizvodnja i nekoliko desetaka puta veća od ukupne proizvodnje svih drugih metala, veliki broj zabilježenih slučajeva pretaljevanja radioaktivnih tvari u čeličanama kao posljedice njihove prisutnost u čeličnom otpadu namijenjenom termičkoj obradi.

Radioaktivne tvari u čelični otpad dospijevaju na različite načine i ukoliko se pravovremeno ne otkriju, mogu taljenjem dospjeti u čeličnu talinu odnosno preradom tako onečišćenog čelika i u gotov proizvod. Ovo može prouzročiti različite zdravstvene probleme ne samo radnicima u čeličani već predstavljati opasnost i za okoliš u cijelosti.

Literaturni podaci [10-12,14-19,21-28], ukazuju na niz slučajeva radioaktivnog onečišćenja metalnog otpada namijenjenog uporabi u čeličanama i ljevaonicama, tablica 3. Ovi slučajevi su očito posljedica nekontroliranog odlaganja otpada koji sadrži radioaktivne tvari različitog podrijetla kao i nedovoljnog nadzora nad pripravom i uporabom čeličnog otpada u metalurškim procesima.

Mnogi do sada zabilježeni incidenti su pokazali da su posljedice onečišćenja radionuklidima u slučaju njihovog pretaljivanja u čeličanama vrlo skupi glede sanacije nastalog stanja i vrlo složenih operacija čišćenja proizvodnih pogona od radioaktivnih tvari [20]. Naravno, da se ovdje ne smiju zanemariti eventualni zdravstveni problemi radnika čija je ozbiljnost povezana s vrstom radionuklida i njegovom aktivnošću.

Tablica 3. Neki od zabilježenih incidenata pojave radionuklida u čeličnom otpadu namijenjenom obradi u čeličanama [10-12,14,15,17,18,21-28]

<b>Godina</b>	<b>Država</b>	<b>Radionuklid</b>
1983.	SAD	$^{60}\text{Co}$
1985.	Brazil	$^{60}\text{Co}$
1987.	SAD	$^{137}\text{Cs}$
1989.	Italija	$^{137}\text{Cs}$
1990.	Irska	$^{137}\text{Cs}$
1991.	Indija	$^{60}\text{Co}$
1993.	Kazahstan	$^{60}\text{Co}$
1996.	Njemačka	$^{60}\text{Co}, ^{137}\text{Cs}, ^{192}\text{Ir}$
1998.	Italija, Španjolska	$^{60}\text{Co}, ^{137}\text{Cs}$
2000.	Francuska	$^{60}\text{Co}$
2002.	Tajvan	$^{60}\text{Co}, ^{137}\text{Cs}$
2004.	Indija/Kina/Švedska	$^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$
2005.	Brazil	$^{226}\text{Ra}$
2007.	Finska/Kina	$^{241}\text{Am}/^{60}\text{Co}$
2008.	Kina/Njemačka	$^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$
2009.	Njemačka	$^{60}\text{Co}$
2010.	Nizozemska	$^{137}\text{Cs}$
2012.	SAD	$^{60}\text{Co}$
2016.	SAD	$^{226}\text{Ra}$

Radioaktivne tvari u čelični otpad mogu dospjeti iz različitih izvora, a koji mogu biti kako slijedi:

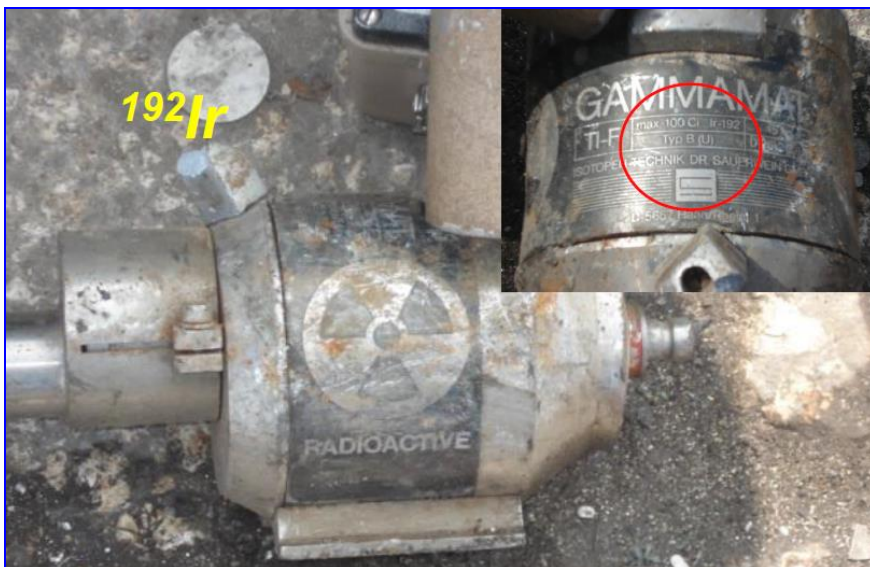


- (a) Otpad nastao rušenjem industrijskih postrojenja za preradu sirovina koje sadrže prirodne radionuklide kao što je prerada fosfata, eksploatacija i prerada nafte i plina i sl. Dijelovi cjevovoda, rezervoari i metalna plovila iz takvih objekata znaju biti obloženi naslagama prirodnih radionuklida, a nakon zamijene tijekom remonta ili drugih razloga ti dijelovi obično završe u čeličnom otpadu.
- (b) Prestanak rada i zaustavljanje nuklearnih postrojenja kao što su nuklearne elektrane i/ili drugi objekti koji koriste. U ovakvim prilikama mogu nastati značajne količine čeličnog otpada kao i otpada od drugih metala koji sadrži radioaktivne tvari. Ovakav otpad se dekontaminira ili odlaže kao radioaktivni otpad sukladno posebnim propisima, no ponekad se može pogrešno odložiti i dospjeti u čelični otpad namijenjen obradi u čeličanama. Materijal koji je iz razgradnje ili rušenja koji sadrži umjetne ili prirodne radionuklide na razinama ispod razine utvrđeni posebnim propisima (regulatornih razina) može se, uz odobrenje nadležnih tijela, uputiti na zbrinjavanje reciklažom.
- (c) Ponekad su se, posebice u prošlosti, zatvoreni radioaktivni izvori znali zagubiti ili izgubiti, pa su tijekom kasnijih akcija čišćenja pronađeni i razvrstani u čelični otpad, često sa zapečaćenim izvorima koji su se još uvijek nalazili unutar zaštitnih spremnika. Tako su znali završiti različiti industrijski radiografski izvori koji su se koristili pri ispitivanju zavara na cjevovodima i sl, a istu su sudbinu znali imati i radioaktivni izvori korišteni u medicini.
- (d) S obzirom na to da su se i ranije, kao i danas, radioaktivni izvori koristili u medicini (npr. radioterapija, dijagnostičke aplikacije), istraživanju (npr. za eksperimentalno ozračivanje materijala ili bioloških uzoraka) i industriji (npr. mjerenje razine, radiografija, i sl.), događalo se da se pri demontaži takvih objekata, a zbog neznanja i nepoštivanja propisa, ovi izvori dospiju u otpad.
- (e) Antikvitetni predmeti (kompasi, busole, džepni satovi,...) u čijoj su proizvodnji korištene radioaktivne (*radioluminiscentne*) boje i premazi, zatim gromobrani, radioaktivne leće i sl., također su ponekad znali završiti u otpadu namijenjenom termičkoj obradi.

Kako se kod pripreme čeličnog otpada za potrebe čeličana i ljevaonica primjenjuju različite metode drobljenja, prešanja i rezanja, postoji velika opasnost da eventualno prisutni odbačeni dijelovi čeličnog otpada tj. *zalutale* opreme, slika 1-4, koja sadrže radioaktivni izvor, budu na ovaj način uništeni, a sadržani radionuklidi dispergirani, što može predstavljati veliku opasnost po radnike u proizvodnom pogonu, a jednako tako i po okoliš u cijelosti.



Slika 1. Dio medicinske opreme zagađen  $^{241}\text{Am}$  pronađen u čeličnom otpadu [17]



Slika 2. Dio medicinske opreme zagađen  $^{192}\text{Ir}$  pronađen u čeličnom otpadu [17]



Slika 3. Dio medicinske opreme zagađen  $^{137}\text{Cs}$  pronađen u čeličnom otpadu [17]



Slika 4. Dijelovi cjevovoda geotermalne vode s naslagama prirodnih radionuklida pronađen u čeličnom otpadu [29]

### 3.2. Sudbina radionuklida u procesu proizvodnje čelika u elektrolučnoj peći

Radioaktivni elementi u čeličnom otpadu uglavnom dolaze u obliku odbačene ili istrošene opreme koja sadrži radionuklide, a koja je bila korištena u medicini, industriji, vojnoj industriji i nuklearnoj tehnici [10]. Kod uporabe čeličnog otpada, u kojem je moguća prisutnost radionuklida, pri izradi čelika u čeličanama postoji velika opasnost od njihove

moguće disperzije u okoliš i to najčešće umjetnih radionuklida  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{241}\text{Am}$  iako se znaju javljati i prirodni radioaktivni izotopi poput  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , i  $^{238}\text{U}$ .

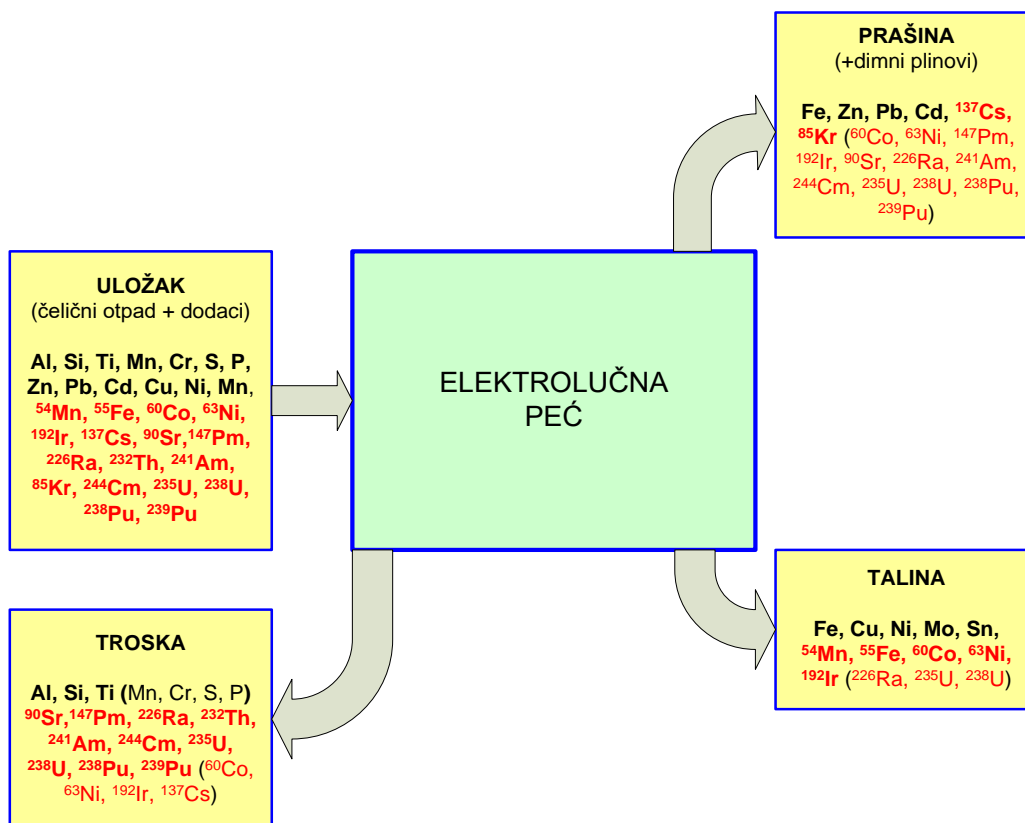
Naime, kako je već ranije spomenuto, pojedine primjese iz čeličnog otpada za vrijeme procesa proizvodnje čelika pri taljenju i rafinaciji potpuno prelaze u trosku (Ca, Al, Si, Ti) ili u otpadni plin (Zn, Cd), odnosno neke samo djelomično prelaze u trosku (Mn, Cr, S, P) ili pak ostaju u talini (Cu, Ni, Mo, Sn...). Međutim, manje je poznato da čelični otpad može sadržavati i primjese iz grupe prirodnih i umjetnih radionuklida i to najčešće  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{238}\text{U}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , i  $^{241}\text{Am}$ .

Tijekom procesa proizvodnje čelika radioaktivni elementi se raspodjeljuju između taline, prašine u dimnim plinovima i troske, ovisno o njihovim fizikalnim i kemijskim svojstvima, tablica 4 i slika 5.

Tablica 4. Neka od svojstava radionuklida i njihova raspodjela tijekom procesa u elektropeći [10]

Radionuklid	Toksičnost	Rasprostranjenost	Primarno zagađenje
$^{60}\text{Co}$	mala do srednja	mala	talina
$^{226}\text{Ra}$	visoka	velika	troska, prašina
$^{137}\text{Cs}$	srednja	velika	prašina
$^{192}\text{Ir}$	srednja	mala	talina
$^{241}\text{Am}$	visoka	velika	troska
$^{232}\text{Th}$	visoka	mala	troska
$^{90}\text{Sr}$	visoka	velika	troska, prašina

Iz tablice 4 je vidljivo da se u talini zadržavaju  $^{60}\text{Co}$  i  $^{192}\text{Ir}$ , u elektropečnu prašinu odlazi  $^{137}\text{Cs}$  i manje količine  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{226}\text{Ra}$ , a u trosku se izdvajaju  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{90}\text{Sr}$  gdje se može pronaći i prirodni radionuklid  $^{40}\text{K}$ .



Slika 5. Raspodjela radionuklida između prašine, troske i taline tijekom elektropećnog procesa proizvodnje čelika

Podaci o koeficijentima raspodjele radionuklida između čelične taline, troske i prašine odnosno dimnih plinova za vrijeme trajanja procesa proizvodnje čelika, a koji je ovisan o njihovim fizikalnim i kemijskim svojstvima, mogu se naći u ranije objavljenim rezultatima istraživanja [30], tablica 5 i 6.

Tablica 5. Faktori raspodjele radionuklida slučajno dospjelih u proces proizvodnje čelika u elektrolučnoj peći i kisikovom konvertoru [30]

Radionuklid	Faktor raspodjele, %		
	Talina	Troska	Prašina/ dimni plinovi
<sup>60</sup> Co	98	1	1
<sup>63</sup> Ni	98	1	1
<sup>85</sup> Kr	-	-	100
<sup>90</sup> Sr	-	99	1
<sup>137</sup> Cs	-	<1	>99
<sup>147</sup> Pm	-	99	1
<sup>192</sup> Ir	98	1	1
<sup>226</sup> Ra	-	99	1
<sup>238</sup> Pu, <sup>239</sup> Pu	-	99	1
<sup>241</sup> Am	-	99	1
<sup>244</sup> Cm	-	99	1

Tablica 6. Faktori raspodjele nekih radionuklida dobiveni  $\gamma$ -spektroskopijskim mjerenjem nakon taljenja nisko radioaktivnog otpada u elektrolyučnoj peći [30]

Radionuklid	Faktor raspodjele, %		
	Talina	Troska	Prašina
$^{60}\text{Co}$	88	11	1
$^{63}\text{Ni}$	90	10	-
$^{90}\text{Sr}$	<1	97	2
$^{137}\text{Cs}$	<1	60	40
$^{226}\text{Ra}$	3.2	95,7	1,1
$^{238}\text{Pu}, ^{239}\text{Pu}$	1.3	94,9	3,8
$^{241}\text{Am}$	1	99	nije analizirano
$^{226}\text{Ra}$	1	99	nije analizirano

### 3.3. Mjere sprječavanja pojave radionuklida u procesima proizvodnje čelika

Kako se kod pripreve čeličnog otpada za potrebe čeličana i ljevaonica primjenjuju različite metode drobljenja, prešanja i rezanja postoji velika opasnost da eventualno prisutni odbačeni dijelovi opreme koji sadrže radionuklide budu na ovaj način uništeni, a sadržani radionuklidi dispergirani, što može predstavljati veliku opasnost po okoliš u cijelosti.

S obzirom na ovu opasnost od mogućeg štetnog djelovanja proizvedenog čelika ili pak nastalog proizvodnog otpada ukoliko sadrže radionuklide, vrlo je bitno spriječiti ulazak radionuklidima onečišćenog čeličnog otpada u čeličanu. Stoga je potrebno primijeniti mjere nadzora i kontrole čeličnog otpada na samom ulazu u čeličanu i/ili kontrolu prisutnosti radionuklida u otpadu prije samog ulaganja u elektropeć. Jednako tako, a u svrhu zaštite okoliša od širenja radionuklida, trebalo bi na njihovu prisutnost ispitati i proizvedeni čelik kao i sve vrste proizvodnog otpada nastalog u procesu proizvodnje.

Budući da su sakupljanje čeličnog otpada i njegovo korištenje u proizvodnji čelika prilično rasprostranjene djelatnosti, Europska Komisija je još 1999. godine donijela niz zaključaka o kontroli i nadzoru metalnog otpada radi određivanja prisutnosti radionuklida, pri čemu je važna suradnja stručnjaka i prerađivača, edukacija rukovatelja metalnim otpadom te razvijanje sustava zaštite od zračenja [10]. Budući da u Republici Hrvatskoj još uvijek nema odgovarajuće legislative, nužno je koristiti postojeće međunarodne preporuke i propise.

Prvenstveno bi zbog zaštite zdravlja ljudi i uklanjanja mogućnosti onečišćenja okoliša trebalo propisati obvezu instaliranja sustava za praćenje radionuklida u čeličanama i ljevaonicama RH.

Izgradnjom sustava za nadzor i praćenje (monitoring) radionuklida na samom ulazu čeličnog otpada u čeličane osigurava se zaštita zdravlja ljudi i otklanja mogućnost obrade kontaminiranog otpada tj. onečišćenja okoliša radioaktivnim tvarima eventualno prisutnim u uporabljenom čeličnom otpadu. Istovremeno se postavlja novi zahtjev pred sakupljače i isporučitelje ove vrste otpada za uvođenjem kontrole čeličnog otpada u „dvorištu sakupljača“ ovog otpada, koji su često i njegovi isporučitelji čeličanama ili drugim obrađivačima.

Za nadzor i praćenje radionuklida u čeličnom otpadu, gotovim proizvodima, proizvodnim ostacima (troska, ogorina ili „cunder“, elektropečna prašina, istrošeni vatrostalni materijal) kao i materijalima korištenim u procesu proizvodnje čelika (ferolegure, ugrađeni vatrostalni materijal, nemetalni dodaci i sl.), primjenjuju se obično dva osnovna tipa instrumenata i to a) mobilni ili ručni, prijenosni uređaji, slika 6 i 7, i b) stacionarni automatski uređaji, slika 8 i 9.

Pod prednostima ručnih prijenosnih uređaja, svakako se podrazumijeva njihova cijena, veliki broj proizvođača i različitih tipova, a posebno mobilnost ovih uređaja odnosno mogućnost njihovog korištenja na raznim mjestima u procesu proizvodnje i prerade čelika kao što su skladišta sirovine/čeličnog otpada i pratećih materijala, čišćenju sirovog proizvedenog čelika i izdvojenim proizvodnim ostacima (troska, ogorina, prašina, itd). Prijenosni uređaji imaju i svoje nedostatke kao što je ograničena mogućnost njihove uporabe tijekom nadzora i kontrole velikih pošiljki (vagona, kamiona, kontejnera,...) čeličnog otpada.



Slika 6. Prijenosni uređaj za utvrđivanje radioaktivnih tvari u čeličnom otpadu  
AT6102A Spectrometer, ATOMTEX, Bjelorusija [31]



Slika 7. Prijenosni uređaj za utvrđivanje radioaktivnih tvari u čeličnom otpadu  
identiFINDER R400, FLIR Systems, SAD [32]

Zahtjevi koje trebaju ispunjavati prijenosni uređaji za monitoring radionuklida u čeličnom otpadu odnose se na njihovu masu, mjerno područje, vrijeme mjerenja, pogrešku mjerenja itd., tablica 7.

Tablica 7. Zahtjevi koje trebaju ispunjavati prijenosni uređaji za monitoring radionuklida [11]

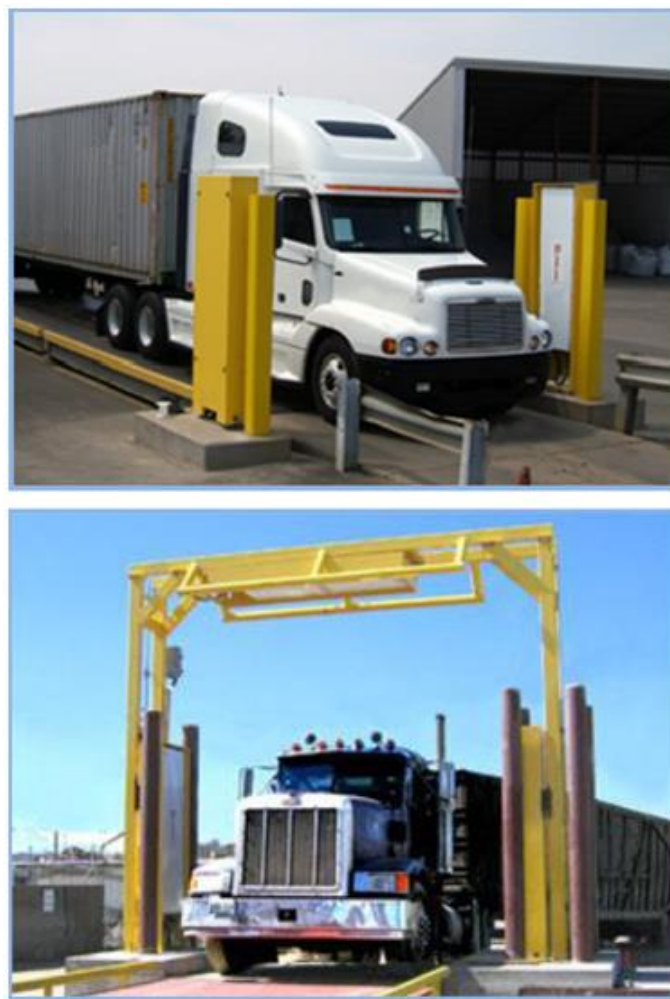
Parametar/karakteristika	Temeljni zahtjev	Optimum
Mjerno područje brzine doze zračenja, $\mu\text{Sv h}^{-1}$	0,05-100	0,08-10
Pogreška mjerenja, %	$\leq 20$	$\leq 15$
Vrijeme mjerenja u jednoj točki, sek.	$\leq 5$	$\leq 2$
Energija, MeV	0,05-3,0	0,05-2,0
Masa, kg	$\leq 5$	$\leq 2$
Radna temperatura, °C	-20 do +50	-20 do +50

Uz zahtjeve prikazane u tablici 7, prijenosni uređaji za monitoring radionuklida, nerijetko moraju ispunjavati i dodatne zahtjeve koji se uglavnom odnose na mogućnost njihovog povezivanja sa računalom, opskrbljenost sa dodatkom za spektrometrijsku analizu radionuklida sadržanih u otpadu kao i mogućnost odabira i zamjenjivosti detektora ovisno o vrsti zračenja. Ukoliko prijenosni uređaji za monitoring radionuklida ne zadovoljavaju potrebe kontrole i nadzora eventualno prisutnih radionuklida u procesima proizvodnje čelika, uvijek se mogu nadopuniti stacionarnim uređajima kojima je moguće provesti detaljna pretraživanja otpada na prisutnost radionuklida. Naime, monitoring čeličnog otpada u svrhu otkrivanja prisutnosti radioaktivnog materijala, najčešće se i provodi primjenom stacionarnih uređaja (u kombinaciji s mobilnim), što je opravdanim pokazala praksa u velikom broju suvremenih čeličana i tvrtki koje se bave skupljanjem i/ili pripravom čeličnog otpada za tržište.



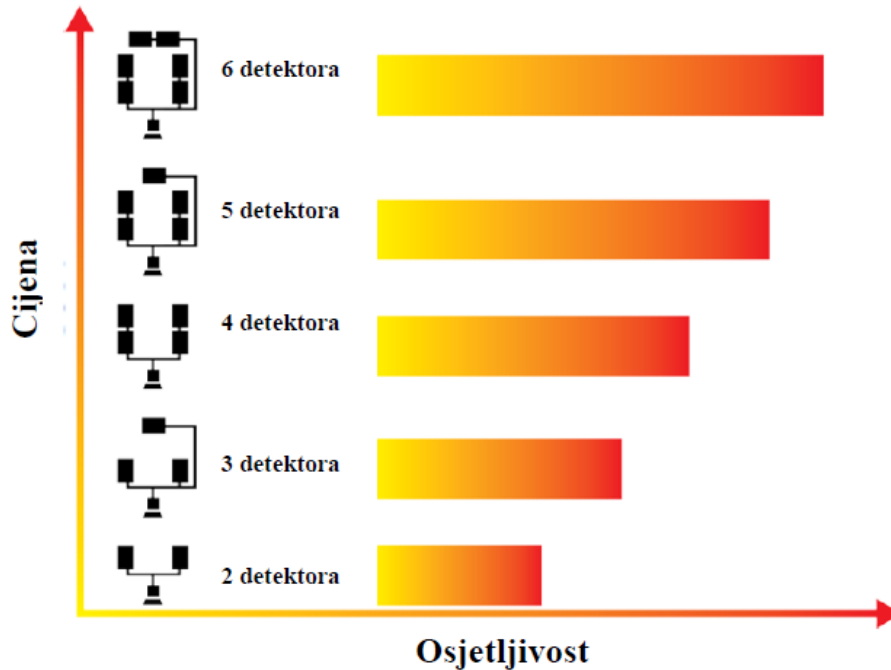
Stacionarni uređaji su najčešće smješteni na samom ulazu u tvrtkama koje se bave sakupljanjem i pripravom čeličnog otpada ili čeličanama u kojima se taj otpad obrađuje. Ovi uređaji su obično u obliku portala, kranova ili rampi između kojih se ili ispod kojih se kreće vozilo kojim se doprema čelični otpad. Danas postoji niz razvijenih stacionarnih sustava za monitoring radionuklida u čeličnom otpadu, a vrlo često se koriste sustavi svjetski poznatih proizvođača poput RadComm Systems (Kanada) [33], Thermo Fisher Scientific Inc. (SAD) [34], PEO Radiation Technology (Belgija) [35], LUDLUM Measurement Inc. (SAD) [36] itd.

Oprema koja čini stacionarne sustave sastoji se od visoko sofisticirane sprege vrlo osjetljivih detektora za sve vrste zračenja i mikro procesnu tehnologiju, a u isto vrijeme se odlikuje jednostavnošću rukovanja. Ovi sustavi, ovisno o namjeni i obujmu proizvodnje čeličane ili količinama sakupljenog čeličnog otpada kojeg sakupljač priprema za prodaju i distribuciju, mogu imati dva ili više detektora radioaktivnih tvari, slika 8.



Slika 8. Stacionarni sustavi za nadzor radioaktivnih tvari u čeličnom otpadu (broj instaliranih detektora može biti od 2 do 6) [37,38]

Pri odabiru sustava za nadzor radioaktivnih tvari važnu ulogu ima osjetljivost ugrađenog detektora za mjerenje brzine doze zračenja kao i njihov broj, a što znatno utječe na cijenu uređaja, slika 9. Uz osjetljivost, postoje mnogi drugi čimbenici koji određuju lokaciju i raspored opreme u prostoru, a to može biti: većina i razmak između detektora, razina prirodnog zračenja, vrsta izvora zračenja i njegov položaj u vozilu, oblik i veličina pojedinih komada otpada u pošiljci, brzina kretanja vozila kroz zonu mjerenja, dimenzija, oblik vozila itd.



Slika 9. Odnos broja ugrađenih detektora u stacionarni sustav i osjetljivosti samog sustava te njegove cijene [39]

Raspored pojedinih dijelova monitorinških sustava u prostoru obično se izvodi na način sukladan konfiguraciji i rasporedu pojedinih elemenata sustava (zona nadzora, detektori, monitori, uređaji za zapisivanje, uređaji za dojavu) i u uskoj je vezi s karakteristikama detektora radioaktivnog zračenja (dimenzije, vrste brojača i osjetljivosti) te odabirom softwera.

Stacionarnim monitoring sustavom se najčešće otkrivaju srednje jaki i jaki  $\gamma$ -emiteri poput:  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{241}\text{Am}$  te se prilikom instalacije ovog sustava treba voditi računa da detektori budu što bliže transporteru koji se kontrolira. Na takav se način sprječava pad osjetljivosti za određivanje brzine doze zračenja izvora u čeličnom otpadu koja se kreće od  $0,2 \mu\text{Sv/h}$  do  $0,3 \mu\text{Sv/h}$  ili  $\mu\text{Gy/h}$  na udaljenosti od 1 m stjenke transportnog kontejnera (vagona ili kamiona) i jednaka je dvostrukom ili trostrukom višekratniku razine prirodnog zračenja [11].

Na temelju izmjerenih vrijednosti radioaktivnog zračenja i usporedbe radioaktivnog zračenja i usporedbe s referentnim vrijednostima, monitorinški sustav daje korisniku upute za nastavak aktivnosti čiji smjer može biti: istovar, vraćanje pošiljke isporučitelju ili dodatna kontrola, što ovisi o razini eventualno utvrđene i izmjerene brzine doze zračenja. U slučaju pojave radioaktivnog onečišćenja čeličnog otpada koje po izmjerenoj razini zračenja znači opasnost za ljude u neposrednoj blizini, to jest pojava se pretvara u izvanredni slučaj, pokreću





a)



b)

Slika 11. Dodatna kontrola a) pri transportu čeličnog otpada  
i b) pri utovaru čeličnog otpada u „košaru“ [40]

### 3.4. Mjere sprječavanja širenja radionuklida iz procesa proizvodnje čelika u okoliš

S obzirom na ogromno značenje čeličnog otpada kao sirovine u procesu proizvodnje čelika, od vitalnog je značaja biti potpuno upoznat sa njegovim sastavom odnosno oblicima čeličnih predmeta ili njihovih dijelova (limovi, šipke, strugotine, ambalaža, strojni dijelovi, ...) koji čine sam otpad kao i njihovim podrijetlom. Ovo poznavanje podrazumijeva kako vrstu čelika (ugljični, legirani, nelegirani, itd) i njihov kemijski sastav, tako i prisutnost neželjenih primjesa koje se mogu nalaziti u čeličnom otpadu (neželjezni i nemetalni materijali poput zemlje, gume, plastike, tkanine, drveta i druge organske supstance). Naime, za vrijeme izrade čelične taline u elektrolučnoj peći, sve ove neželjene tvari tijekom taljenja ili rafiniranja, najčešće prelaze u trosku ili prašinu, no poneke se mogu potpuno rastaljene zadržati u talini, a time značajno utjecati na kvalitetu proizvedenog čelika ili ga učiniti potpuno neupotrebljivim ukoliko se radi o onečišćenju taline radioaktivnim tvarima.

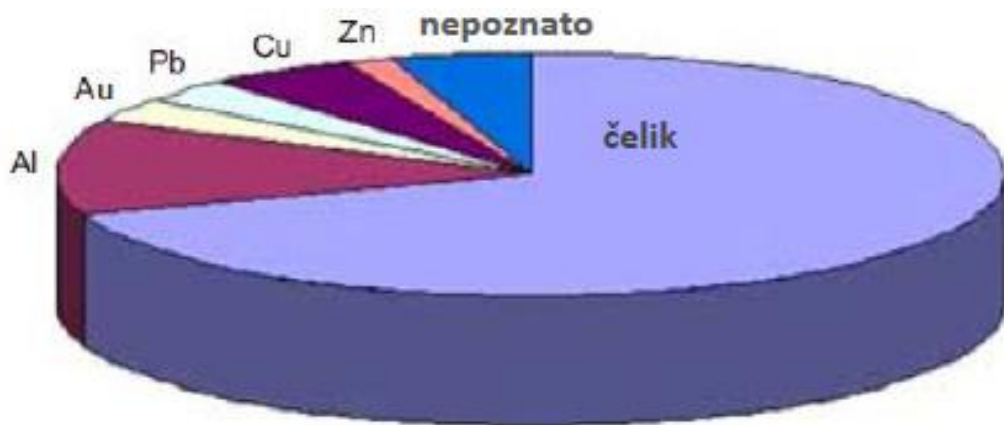
Iako se danas, u suvremenim čeličanicama poduzimaju mjere sprječavanja ulaska radioaktivnog čeličnog otpada uvođenjem monitoringa instaliranjem stacionarnih uređaja (u kombinaciji s mobilnim), što se pokazalo vrlo učinkovitim i opravdanim, još uvijek se događaju slučajevi identifikacije radionuklida u proizvedenom sirovom čeliku ili pak u proizvodnim ostacima iz ovih procesa.

U prošlosti je zabilježen niz događaja otkrivanja radioaktivnih tvari u čeličnom otpadu, a u nekim slučajevima i u proizvedenom čeliku ili drugom metalu dobivenom pretaljivanjem otpada. Podaci u dostupnim literaturnim izvorima [10-12,23,24,30,41] ukazuju na relativno značajan broj zabilježenih slučajeva prisutnosti radioaktivnih elemenata u čeliku i proizvodnim ostacima iz procesa proizvodnje čelika, a njihov redoslijed prema pojavnosti radionuklida je slijedeći:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{90}\text{Sr}$ . Iako je danas velika pažnja posvećena postupcima nabave, korištenja i zbrinjavanja radioaktivnih izvora, broj slučajeva u kojima se pojavljuju u čeličnom i drugom metalnom otpadu još uvijek je prevelik.

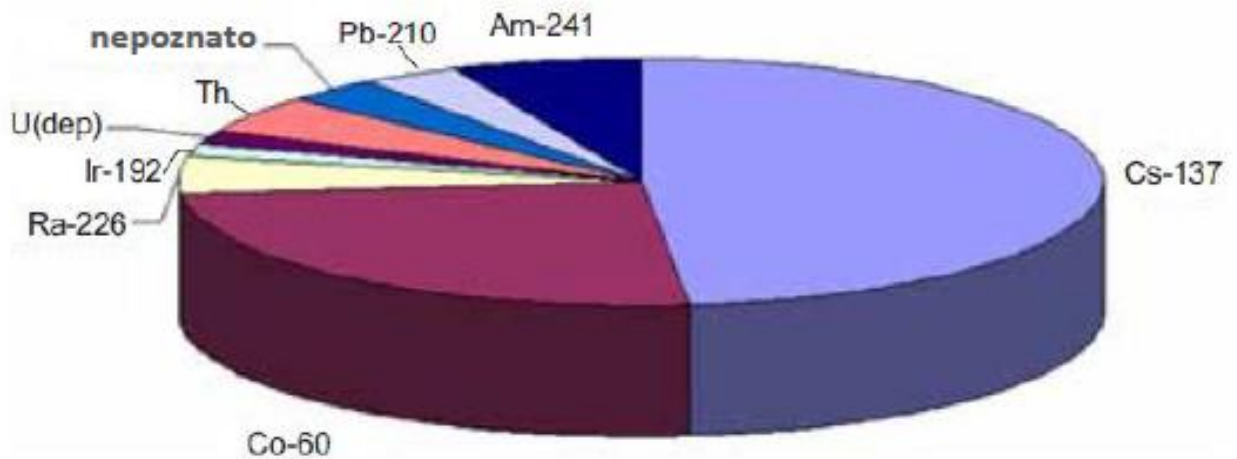
Prije desetak godina samo u Nizozemskoj je u razdoblju od 2003. do 2007. zabilježeno godišnje od 210 do 388 slučajeva metalnog otpada s povećanom razinom radijacije, dok je taj broj u SAD bio i iznad 5.000 [42]. Prema podacima Međunarodne Agencije za atomsku energiju (eng. *International Atomic Energy Agency*, IAEA), iz 2012. godine [43], od 60 slučajeva pretaljivanja radioaktivnih izvora u razdoblju od 1983. do 1998. oko 68 % ih se dogodilo u čeličanicama, a od industrije u kojoj se proizvode neželjezni metali najviše slučajeva je zabilježeno u aluminijskoj industriji, slika 12.

Istovremeno je zabilježeno da se u ukupnom broju zabilježenih radioaktivnih incidenata najčešće pojavljuju  $^{137}\text{Cs}$  i to u 48% slučajeva i  $^{60}\text{Co}$  26% dok  $^{241}\text{Am}$  i  $^{226}\text{Ra}$  sudjeluju sa svega 5-6% ukupnom broju slučajeva pretaljivanja, slika 13.

Iako je učestalost radioaktivnih incidenata ove vrste značajno smanjena u posljednjih nekoliko godina, još uvijek se javljaju pojedinačni incidenti koji nas podsjećaju da su ti rizici još uvijek prisutni diljem Europe što ukazuju na stalnu potrebu za praćenjem metalnog otpada namijenjenog pretaljivanju te poduzimanje dodatnih mjerenja radioaktivnosti i nakon taljenja kako bi se osigurala i potvrdila odsutnost radioaktivnog onečišćenja u proizvedenom čeliku kao i u troski, prašini i dimnim plinovima nastalih za vrijeme tog proizvodnog procesa [44-46].



Slika 12. Udjeli sektora proizvodnje pojedinih metala u ukupnom broju zabilježenih slučajeva pretaljivanja radionuklida [43].



Slika 13. Udjeli pojedinih radionuklida u ukupnom broju zabilježenih slučajeva njihovog pretaljivanja u proizvodnji metala [43].

Budući da se za potrebe stavljanja na tržište proizvedenog čelika njegova kvaliteta kontrolira sukladno zahtjevima norme EN 10204: 2004-3.1 prema kojoj nije obvezno provoditi ispitivanja eventualne prisutnosti radionuklida. No, kako je bilo nužno uspostaviti ravnomjerne osnovne sigurnosne standarde za zaštitu zdravlja pojedinaca koji su izloženi profesionalnim, zdravstvenim i javnim opasnostima od ionizirajućeg zračenja, pa tako i zračenja koje bi moglo biti posljedica prisutnosti radionuklida u čeliku i čeličnim proizvodima koji nas okružuju, donesena je na području EU Direktiva Vijeća 2013/59/Euratom [47].

Ova Direktiva o osnovnim sigurnosnim standardima za zaštitu od opasnosti koje potječu od izloženosti ionizirajućem zračenju, i o stavljanju izvan snage direktiva 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom, pomogla je u prevladavanju postojećih razlika među nacionalnim normama/propisima članica EU o nadzoru radioaktivnosti. Naime, prije stupanja na snagu Direktive Vijeća 2013/59/Euratom nije bilo moguće jednostavno usporediti rezultate mjerenja radioaktivnosti u čelicima i gotovim proizvodima jer su se koristile različite vrijednosti dopuštenih granica radioaktivnosti kao i različite tehnike analize odnosno različiti referentni materijali

(standardi), a što je dovelo do sporova i poteškoća u trgovanju čelikom i njegovim proizvodima.

Kako bi dokazali svojim kupcima da su u svojim procesima proizvodnje čelika i njegove prerade osigurali i uspostavili osnovne sigurnosne standarde za zaštitu zdravlja pojedinaca koji su izloženi profesionalnim, zdravstvenim i javnim opasnostima od ionizirajućeg zračenja sukladno Direktivi Vijeća 2013/59/Euratom, proizvođači i prerađivači čelika danas nude svojim kupcima i ovu dodatnu i vrlo važnu informaciju i to u obliku dokumenta/izjave, slika 14 i 15.

Pri mjerenju i utvrđivanju radioaktivnosti u čeličnom otpadu, mineralnim dodacima i koksu koji čine uložak za elektropec i njihov mogući sadržaj radionuklida koji se tijekom elektropečnog procesa raspoređuju između taline, troske, prašine i dimnih plinova, posebno je važno brinuti o umjetnim radionuklidima koji se najčešće pojavljuju ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{192}\text{Ir}$ ) no ne smije se zanemariti niti moguća prisutnost prirodnih radionuklida ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{238}\text{U}$ ) koji svojim udjelima pridonose ukupnoj koncentraciji radioaktivnosti ispitivanog materijala.

Posljednjih dvadesetak godina u EU i šire postoji opravdana sumnja u mogućnost pojave onečišćenog čeličnog otpada nastalog na području jugoistočne Europe oslabljenim uranom ( $^{238}\text{U}$ ) i to kao posljedica intenzivnog korištenja proizvoda vojne industrije u devedesetim godinama prošlog stoljeća kao i kasnijim aktivnostima na demilitarizaciji regije [50-53]. Zbog toga se pri trgovanju čeličnim otpadom nastalom na ovom području ili području Bliskog istoka, provode vrlo stroge mjere nadzora i kontrole prisutnosti  $^{238}\text{U}$  kako ne bi došlo do radioaktivnog onečišćenja pri proizvodnji čelika pretaljivanjem čeličnog otpada s ovih prostora.

## **RADIOACTIVITY IN STEEL**

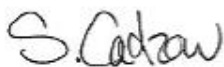
November 2016

**The following statement is applicable to all steel manufactured by British Steel Limited**

All forms of our steel products we supply are not radioactive according to National Legislation in the country of origin. Trace levels of naturally occurring radioisotopes can be present in some of our feed stocks.

For the security of our customers, employees and process plant, British Steel Limited manufacturing operations have multi-head, high-sensitive radiation instruments and portal detectors in place to prevent man-made or non-natural radioactive materials entering our work processes and being melted into the steel. For quality assurance purposes, our steel is also monitored for any radioactivity prior to entering our manufacturing processes, thereby preventing the manufacture of radioactive contaminated steel products. We also actively encourage all our suppliers of scrap metal to check their products before despatch to British Steel Limited using high-sensitive detectors.

Yours faithfully



**Stuart Cadzow**  
Manager Health, Safety & Environment  
British Steel

Slika 14. Dokument /Izjava tvrtke British Steel-a o usklađenosti kvalitete proizvoda sa zahtjevima Direktive Vijeća 2013/59/Euratom [48].



Esch-sur-Alzette, 14<sup>th</sup> October 2016

**Producing Entities:**

ArcelorMittal Belval & Differdange sites of Belval and Differdange, ArcelorMittal Duisburg, ArcelorMittal Hamburg, ArcelorMittal Guipuzkoa, Sites of Bergara and Olaberria, ArcelorMittal Poland SA, ArcelorMittal Rodange & Schifflange site of Rodange, ArcelorMittal Hunedoara, ArcelorMittal Ostrava, ArcelorMittal Warszawa

1. The total quantity of ferrous scrap, alloys and added fluxes supplied for the production of raw steel to the Electric Arc Furnace and Basic Oxygen Furnaces melt-undergoes a radioactivity detection control prior to its access to the production sites. Any material presenting a measurable radioactivity level is rejected at this receiving control.
2. Samples from the total production of raw steel and slag are monitored on radioactivity prior to the processing of steel at the rolling mill.
3. Whatever the considered steel may be, its radiological level has a value below the regular limit effective dose for the general public, which is 1 mSv (milliSievert) per year. It is also below the worldwide middle effective dose, calculated by the UNSCEAR<sup>1</sup>, for the ionizing radiation emitted by natural sources (soil, cosmic rays...), which is 2.4 mSv per year.

The steels delivered by the plants of ArcelorMittal Sections are in conformity with the 2013/59/EURATOM<sup>2</sup> Directive and 98/29/EURATOM<sup>3</sup> Directive; i.e. they do not imply an exposition growth of workers or the general public to natural sources of radiation.



ArcelorMittal Europe Long Products  
J.P. Lorrain  
Head of Energy & Environment

Slika 15. Dokument /Izjava tvrtke ArcelorMittal Europa o usklađenosti kvalitete proizvoda sa zahtjevima Direktive Vijeća 2013/59/Euratom [49].

### 3.4.1. Stanje nadzora radionuklida u Hrvatskim čeličanama

Sagledavajući problem moguće prisutnosti radioaktivnih metala u čeličnom otpadu, proizvedenom čeliku i gotovim čeličnim proizvodima, a na temelju iskustva najpoznatijih svjetskih i europskih proizvođača čelika, u Republici Hrvatskoj su još prije gotovo dvadeset godina T. Sofilić i suradnici [10,11,54] utvrdili potrebu i opravdanost za uvođenjem sustava nadzora i kontrole prisutnosti radionuklida u čeličnom otpadu i sirovom čeliku.

Prvi rezultati ispitivanja prisutnosti radionuklida u metalurškoj industriji pomoću  $\gamma$ -spektrometrijske analize, proveo je T. Sofilić i suradnici i to na uzorcima čelika proizvedenih u razdoblju od 1992. do 2002. god. u sisačkoj čeličani [55]. Istovremeno su analizirani i uzorci upotrijebljenih mineralnih dodataka, karburita, vatrostalnih materijala, nastale troske i elektropećne prašine, tablica 8.

Tablica 8. Rezultati  $\gamma$ -spektrometrijske analize sirovog čelika, proizvodnih otpada i materijala korištenih u elektropećnom procesu [55, 56].

Materijal	Koncentracija aktivnosti, Bqkg <sup>-1</sup>			
	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs	<sup>226</sup> Ra	<sup>238</sup> U
Prašina	349,3±20,4	47,5±1,7	9,2±1,7	11,3±6,4
Troska	10,0±2,0	<GO	14,7±0,7	13,9±2,6
Čelična talina	9,4±2,1	<GO	2,2±0,6	2,2±0,6
SiMn	<GO	<GO	<GO	<GO
FeSi	10,0±2,0	<GO	2,2±0,6	2,2±0,6
Boksit	34,2±7,2	0,9±0,3	59,6±1,9	58,9±6,3
Fluorit	10,0±2,0	<GO	123,8±2,3	118,5±7,5
Vapno	<GO	<GO	<GO	<GO
Koks	10±1,1	<GO	2,0±0,5	2,0±0,4
Grafitna elektroda	46,4±8,7	<GO	2,5±0,5	2,5±0,6
Vatrostalni mat.	22,2±6,0	<GO	9,1±0,9	8,7±3,1

GD- granica određivanja

Rezultati prikazani u tablici 7, ukazali su na prisutnost radionuklida koji po podrijetlu i izmjerenim vrijednostima koncentracija aktivnostima nisu predstavljali opasnost, ali svakako su ukazivali na potrebu za kontrolom njihovog sadržaja u ovim materijalima, kao i uvođenjem kontrole radionuklida u čeličnom otpadu, sirovom čeliku i gotovim proizvodima.

Iako je danas većina suvremenih proizvođača čelika ugradila opremu za nadzor i detekciju radioaktivnih tvari u čeličnom otpadu i drugim materijalima na ulazu u proizvodni pogon, ona ne može pružiti punu odnosno apsolutnu zaštitu od radioaktivnih emisija. Naime, ako se radioaktivni izvor ne ukloni iz čeličnog otpada prije taljenja on može zagaditi proizvedeni čelik kao i proizvodne ostatke, a što podrazumijeva i svu opremu korištenu u ovom proizvodnom procesu.

Sisačka čeličana je izgradila i implementirala sustav za nadzor sadržaja radionuklida u čeličnom otpadu, čeliku i čeličnim proizvodima [57]. Sustav se sastoji od tri stacionarne detektorske jedinice/portala za detekciju radioaktivnosti u čeličnom otpadu proizvođača EXPLORANIUM (Kanada), a za nadzor radionuklida u gotovim proizvodima, proizvodnim ostatcima (troska, kovarina, elektropećna prašina) kao i materijalima korištenim u procesu

proizvodnje čelika (ferolegure, nemetalni dodaci i sl.) primjenjuje se mobilni/prijenosni uređaj IdentiFINDER (SAD).

Kako je već spomenuto u poglavlju 3.2, nakon unosa radioaktivnog materijala u elektropeć, on se obično raspodjeljuje između čelične taline, troska i dimnih plinova odnosno prašine, a što ovisi o karakteristikama samog radionuklida kao i termodinamičkim uvjetima u peći, tipu peći, njenoj veličini, vremenu taljenja, itd.

S obzirom na to da je čelik danas najtraženiji reprodukcijски materijal čija proizvodnja na globalnoj razini ima trend rasta, nužno je osvijestiti svakog proizvođača o mogućoj prisutnosti radionuklida u čeličnom otpadu namijenjenom termičkoj obradi kao i štetnim posljedicama njegovog pretaljivanja i uzrokovanja različitih zdravstvenih problema ne samo po radnike u čeličanama već i o opasnosti za okoliš u cijelosti. U prilog ozbiljnosti mogućih posljedica ovakvih nezgoda po ljudsko zdravlje i njihovom opsegu, govore i podaci o vremenu poluraspada pojedinih radionuklida. Naime, kako je vrijeme poluraspada radionuklida vrijeme potrebno da se njegova početna aktivnost smanji na polovicu početne vrijednosti, to ugroza okoliša od radioaktivnog djelovanja može trajati vrlo dugo. Koliko dugo mogu trajati ta štetna djelovanja najbolje govore podaci o vremenima poluraspada za neke od najčešće utvrđenim radionuklida u zabilježenim slučajevima onečišćenog čeličnog otpada i njegovog pretaljivanja u čeličanama, a koje npr. za  $^{60}\text{Co}$  iznosi - 5,27 godina,  $^{137}\text{Cs}$  - 30 godina,  $^{192}\text{Ir}$  - 74 godine,  $^{241}\text{Am}$  - 432 godine, itd. [41].

Na temelju ranije opisanih iskustava utvrđivanja prisutnosti radionuklida u čeličnom otpadu i proizvedenom čeliku najpoznatijih proizvođača čelika u svijetu, i u nas su provedena slična istraživanja [54-57]. Tako je u cilju unapređenja postojećeg sustava praćenja radionuklida u sisačkoj čeličani još 2010. godine istraživano praćenje raspodjele radionuklida prisutnih u čeličnom otpadu i pratećim materijalima između čelika i proizvodnih ostataka i to u procesu proizvodnje ugljičnog čelika u elektrolučnoj peći [41]. Studija je napravljena s namjerom da se potencijalnim kupcima sirovog čelika pokaže sustavna briga o kvaliteti čelika i iznad zahtjeva norme EN 10204: 2004-3.1. prema kojoj se čelične okruglice isporučuju na tržište.

Mjerenja koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima čelika, tablica 9, pokazala su da su sve izmjerene vrijednosti u pogledu prisutnosti pojedinih izotopa i njihovih koncentracija aktivnosti manje od njihove donje granice određivanja (GO) osim vrijednosti koncentracije aktivnosti za  $^{226}\text{Ra}$  u nekoliko uzoraka, gdje su te vrijednosti bile od  $0,496 \pm 0,337 \text{ Bqkg}^{-1}$  do  $0,838 \pm 0,245 \text{ Bqkg}^{-1}$ .

Provedena su i mjerenja koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima elektropećne prašine nastale tijekom procesa proizvodnje ovih čelika. Rezultati dobivenih mjerenja prikazani u tablici 10, u suglasju s očekivanjima s obzirom da su i u prethodnim istraživanja [56] dobivene slične vrijednosti.

Tablica 9. Rezultati  $\gamma$ -spektrometrijske analize ELP ugljičnog čelika u sisačkoj čeličani [41].

Uzorak	Koncentracija aktivnosti $\pm$ pogreška mjerenja, Bqkg <sup>-1</sup>				
	<sup>40</sup> K	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>238</sup> U	<sup>137</sup> Cs
ST1	<4,37	<0,431	0,496 $\pm$ 0,337	<2,18	<0,007
ST2	<4,10	<0,404	<0,441	<2,05	<0,007
ST3	<4,21	<0,415	<0,453	<2,10	<0,007
ST4	<4,18	<0,413	<0,450	<2,09	<0,007
ST5	<5,49	<0,541	<0,590	<2,74	<0,008
ST6	<4,98	<0,491	<0,535	<2,49	<0,009
ST7	<4,60	<0,453	<0,494	<2,29	<0,008
ST8	<4,19	<0,413	<0,450	<2,09	<0,008
ST9	<4,38	<0,431	<0,470	<2,18	<0,007
ST10	<4,17	<0,411	0,803 $\pm$ 0,348	<2,08	<0,007
ST11	<4,25	<0,419	<0,457	<2,12	<0,007
ST12	<4,10	<0,404	0,838 $\pm$ 0,245	<2,05	<0,007

Tablica 10. Rezultati  $\gamma$ -spektrometrijske analize elektropećne prašine u sisačkoj čeličani [41].

Uzorak	Koncentracija aktivnosti $\pm$ pogreška mjerenja, Bqkg <sup>-1</sup>				
	<sup>40</sup> K	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>238</sup> U	<sup>137</sup> Cs
D1	401 $\pm$ 50	4,02 $\pm$ 2,29	6,96 $\pm$ 2,04	21,1 $\pm$ 9,98	8,84 $\pm$ 1,70
D2	516 $\pm$ 59,2	4,85 $\pm$ 2,21	8,94 $\pm$ 1,97	<8,98	11,4 $\pm$ 1,81
D3	573 $\pm$ 63,2	3,91 $\pm$ 1,78	5,92 $\pm$ 1,47	<6,98	19,7 $\pm$ 2,41
D4	582 $\pm$ 66,7	6,06 $\pm$ 2,56	9,35 $\pm$ 2,22	<10,1	20,9 $\pm$ 2,79
D5	457 $\pm$ 52,8	5,35 $\pm$ 2,28	9,45 $\pm$ 1,9	<8,23	18,3 $\pm$ 2,43
D6	452 $\pm$ 51,8	4,82 $\pm$ 2,11	9,11 $\pm$ 1,91	<7,78	19,6 $\pm$ 2,45
D7	372 $\pm$ 43,1	6,03 $\pm$ 2,20	8,13 $\pm$ 1,66	<7,02	14,3 $\pm$ 1,95
D8	378 $\pm$ 44,6	4 $\pm$ 1,95	6,71 $\pm$ 1,63	<8	16,9 $\pm$ 2,21
D9	417 $\pm$ 50,4	4,99 $\pm$ 2,44	9,88 $\pm$ 2,21	<9,87	15,2 $\pm$ 2,24
D10	496 $\pm$ 59,1	8,08 $\pm$ 3,54	10,1 $\pm$ 2,34	<10,3	12,4 $\pm$ 2,03
D11	470 $\pm$ 55,1	8,30 $\pm$ 2,97	12,2 $\pm$ 2,25	12,2 $\pm$ 7,21	11,1 $\pm$ 1,76
D12	320 $\pm$ 40,9	5,05 $\pm$ 2,55	13,3 $\pm$ 2,56	14,5 $\pm$ 7,82	6,83 $\pm$ 1,39

Naime, uzorci prašine sadržavali su prirodne izotope <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>238</sup>U i umjetni izotop <sup>137</sup>Cs. Izmjerene vrijednosti koncentracija aktivnosti kretale su se za <sup>40</sup>K od 320  $\pm$  40,9 Bqkg<sup>-1</sup> do 573  $\pm$  63,2 Bqkg<sup>-1</sup>; za <sup>232</sup>Th od 3,91  $\pm$  1,78 Bq kg<sup>-1</sup> do 8,30  $\pm$  2,97 Bq kg<sup>-1</sup>; za <sup>226</sup>Ra od 5,92  $\pm$  1,47 Bqkg<sup>-1</sup> do 13,3  $\pm$  2,56 Bqkg<sup>-1</sup> i za <sup>238</sup>U od 6,98 Bqkg<sup>-1</sup> do 21,1  $\pm$  9,98 Bqkg<sup>-1</sup>. Izmjerene vrijednosti koncentracija aktivnosti umjetnog izotopa <sup>137</sup>Cs kretale su se od 6,83  $\pm$  1,39 Bqkg<sup>-1</sup> do 20,9  $\pm$  2,79 Bqkg<sup>-1</sup>.

U okviru ovih istraživanja provedena su i mjerenja koncentracije aktivnosti radionuklida u troski, tablica 11, u koju se obično u cijelosti raspodjeljuju prirodni izotopi <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>238</sup>U te umjetni poput <sup>60</sup>Co, <sup>90</sup>Sr, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>241</sup>Am, <sup>244</sup>Cm i s vrlo malim udjelom <sup>137</sup>Cs, čija je prisutnost utvrđena u elektropećnoj prašini.

Tablica 11. Rezultati  $\gamma$ -spektrometrijske analize elektropočne troske u sisačkoj čeličan [41].

Uzorak	Koncentracija aktivnosti $\pm$ pogreška mjerenja, Bqkg <sup>-1</sup>				
	<sup>40</sup> K	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>238</sup> U	<sup>137</sup> Cs
S1	62,9 $\pm$ 12,1	15,1 $\pm$ 2,81	21,4 $\pm$ 2,80	24,3 $\pm$ 7,74	1,57 $\pm$ 0,599
S2	57 $\pm$ 11,3	13,3 $\pm$ 2,66	19,5 $\pm$ 2,57	23,3 $\pm$ 7,22	1,03 $\pm$ 0,433
S3	54,6 $\pm$ 11,3	15,4 $\pm$ 2,95	20,8 $\pm$ 2,71	21,3 $\pm$ 7,27	1,06 $\pm$ 0,434
S4	50,3 $\pm$ 10,5	14,5 $\pm$ 2,86	18,0 $\pm$ 2,42	25,0 $\pm$ 7,30	1,16 $\pm$ 0,499
S5	58,5 $\pm$ 11,5	14,5 $\pm$ 2,94	20,4 $\pm$ 2,67	32,4 $\pm$ 8,47	1,34 $\pm$ 0,5414
S6	52,5 $\pm$ 10,8	13,5 $\pm$ 2,63	19,1 $\pm$ 2,51	29,7 $\pm$ 8,06	1,19 $\pm$ 0,481
S7	49,1 $\pm$ 9,33	13,2 $\pm$ 2,41	15,2 $\pm$ 2,05	20,6 $\pm$ 5,61	1,30 $\pm$ 0,466
S8	55,9 $\pm$ 11,2	13 $\pm$ 2,67	19,0 $\pm$ 2,52	18,9 $\pm$ 6,87	1,11 $\pm$ 0,505
S9	57,9 $\pm$ 11,5	12,9 $\pm$ 2,75	19,7 $\pm$ 2,58	24,5 $\pm$ 7,44	1,55 $\pm$ 0,459
S10	45,3 $\pm$ 10,3	14,9 $\pm$ 2,99	19,5 $\pm$ 2,55	23,6 $\pm$ 7,37	1,19 $\pm$ 0,496
S11	50,1 $\pm$ 11	12,3 $\pm$ 3,83	18,3 $\pm$ 2,51	25,5 $\pm$ 7,62	1,08 $\pm$ 0,438
S12	63,8 $\pm$ 12,2	14,7 $\pm$ 2,97	21,6 $\pm$ 2,82	26,0 $\pm$ 7,61	1,13 $\pm$ 0,331

Nadalje, izmjerene vrijednosti koncentracija aktivnosti pojedinih izotopa kretala se za <sup>40</sup>K od 45,3  $\pm$  10,3 Bqkg<sup>-1</sup> do 63,8  $\pm$  12,2 Bqkg<sup>-1</sup>; za <sup>232</sup>Th od 12,3  $\pm$  3,83 Bqkg<sup>-1</sup> do 15,4  $\pm$  2,95 Bqkg<sup>-1</sup>; za <sup>226</sup>Ra od 18,0  $\pm$  2,42 Bqkg<sup>-1</sup> do 21,6  $\pm$  2,82 Bqkg<sup>-1</sup> i za <sup>238</sup>U od 18,9  $\pm$  6,87 Bqkg<sup>-1</sup> do 32,4  $\pm$  8,47 Bqkg<sup>-1</sup>. Izmjerene vrijednosti koncentracije aktivnosti umjetnog izotopa <sup>137</sup>Cs bile su vrlo niske i iznosile su od 1,03  $\pm$  0,433 Bqkg<sup>-1</sup> do 1,57  $\pm$  0,599 Bqkg<sup>-1</sup>.

Navedene vrijednosti koncentracija aktivnosti prirodnih izotopa u ispitivanim uzorcima mogu se smatrati uobičajenim i zanemarivim, jer su uglavnom geogenog podrijetla i sadržane su u ferolegurama, boksitima, fluoritu, vapnom, koksu, karburitu, grafitnim elektrodama, vatrostalnim materijalima koji se koriste u procesu proizvodnje čelika, u manjim količinama. Izmjerene vrijednosti koncentracija aktivnosti kako prirodnih tako i umjetnih izotopa u čeliku i proizvodnim ostacima iz procesa proizvodnje čelika, ne predstavljaju značajne vrijednosti i ne predstavljaju opasnost po ljudsko zdravlje, važno je znati razinu tih aktivnosti i pokušati ih održati ili čak smanjiti poboljšanjem postojećeg sustava nadzora.

U cilju rješavanja ovog važnog problema proizvođači čelika, a među njima posebno oni iz zemalja članica EU, posljednjih dvadesetak godina pristupili su sustavnom praćenju prisutnosti radionuklida u čeličnom otpadu i sirovom čeliku. Glede normi i propisa kojima bi se odredile granične vrijednosti za dopušten sadržaj odnosno koncentraciju aktivnosti radionuklida u čeličnom otpadu, čeliku i čeličnim proizvodima, još uvijek ne postoji usklađenost niti među zemljama članicama EU, iako se intenzivno radi na donošenju jedinstvene legislative, a u međuvremenu se rabe smjernice i preporuke [43] koje je izdala Međunarodna agencija za atomsku energiju (eng. *International Atomic Energy Agency*, IAEA).

Tako grupa specijalista pri UN – Gospodarskom povjerenstvu za Europu (eng. *United Nations Economic Commission for Europe*, UN-ECE) zadužena za problem radioaktivnog onečišćenja metalurškog otpada sugerira dobrovoljno prihvaćanje kao granične vrijednosti (tzv. *business level*) aktivnost od najviše 100 Bqkg<sup>-1</sup>, iako se u većini europskih zemalja ova vrijednost kreće u intervalu od 100 Bqkg<sup>-1</sup> do 300 Bqkg<sup>-1</sup>.

Istovremeno uvoz čeličnog otpada u zemlje članice EU također treba biti pod nadzorom glede radioaktivnosti ove vrste materijala te je uvoz otpada u zemlje članice EU

uglavnom moguć samo ako onečišćenost ne prelazi vrijednosti brzine doze zračenja od  $5 \mu\text{Svh}^{-1}$  mjereno na udaljenosti od 1 m ili vrijednost koncentracije aktivnosti površine ne prelazi  $0,4 \text{ Bqcm}^{-2}$  ( $\beta$ - i  $\gamma$ -zračenja) odnosno  $0,04 \text{ Bqcm}^{-2}$  ( $\alpha$ -zračenje). Preporuča se da isti čelični otpad ne sadrži koncentraciju aktivnosti iznad  $100 \text{ Bqkg}^{-1}$ .

U zemljama proizvođača čelika izvan EU također postoji neujednačenost kako u pristupu ovom problemu i njegovu rješavanju, tako i u definiranju graničnih ili maksimalno dopuštenih vrijednosti koncentracija aktivnosti radionuklida u čeliku i čeličnim proizvodima pa tako npr. ta granica u Japanu iznosi  $500 \text{ Bqkg}^{-1}$ , a Rusiji  $370 \text{ Bqkg}^{-1}$  [54].

No, kako je bilo nužno uspostaviti ravnomjerne osnovne sigurnosne standarde za zaštitu zdravlja pojedinaca koji su izloženi profesionalnim, zdravstvenim i javnim opasnostima od ionizirajućeg zračenja, pa tako i zračenja koje bi moglo biti posljedica prisutnosti radionuklida u čeliku i čeličnim proizvodima koji nas okružuju, donesena je na području EU Direktiva Vijeća 2013/59/Euratom o osnovnim sigurnosnim standardima za zaštitu od opasnosti koje potječu od izloženosti ionizirajućem zračenju [47]. Ova Direktiva će pomoći u prevladavanju postojećih razlika među nacionalnim normama/propisima članica EU o nadzoru radioaktivnosti jer su države članice dužne poticati uspostavu sustava otkrivanja prisutnosti radioaktivnih onečišćujućih tvari u metalnim proizvodima uvezenima iz trećih zemalja, na mjestima kao što su veliki pogoni za uvoz metala ili važna prometna čvorišta. Nadalje, države članice osiguravaju da odgovorne osobe u pogonima za preradu metalnog otpada odmah informiraju nadležno tijelo ako se sumnja ili zna za taljenje ili druge metalurške operacije otpada kontaminiranog radionuklidima te spriječi korištenje kontaminiranog materijala kao i njegovo stavljanje tržište.

Ova direktiva je stupila na snagu, države članice EU su je bile dužne transponirati u svoje nacionalne propise do 6. veljače 2018. Nakon toga i svi gospodarski subjekti, koji se bave djelatnostima u čijem radu je moguće stupiti u kontakt s otpadom kontaminiranim radionuklidima, dužni su urediti svoje akte uvrštavanjem odredbi iz Direktive Vijeća 2013/59/Euratom.

## 4. ZAKLJUČAK

S obzirom na zabilježene pojave prisutnosti radioaktivnih elemenata u čeličnom otpadu, proizvodnim ostacima te gotovim proizvodima metalurške i metaloprerađivačke industrije, a na temelju iskustva najpoznatijih svjetskih i europskih proizvođača čelika, nužno je i opravdano u svakoj čeličani uvođenje sustava nadzora i kontrole prisutnosti radionuklida. U ovom preglednom radu je prikazana, uz osnovne pojmove o čeličnom otpadu i njegovom značaju u proizvodnji čelika kao sveprisutnog konstrukcijskog materijala, i mogućnost prisutnosti radioaktivnih tvari. Naime, radioaktivnim tvarima se mora posvetiti jednaka, ako ne i veća pozornost od uobičajenih pratećih onečišćujućih tvari anorganskog i organskog podrijetla u čeličnom otpadu, imajući na umu moguće štetne posljedice po okoliš, ukoliko te onečišćujuće tvari tijekom procesa proizvodnje čelika dospiju u zrak, vodu ili tlo.

Na temelju navedenoga u ovom radu moguće je zaključiti kako slijedi:

- Potpuno poznavanje fizikalnih i kemijskih svojstava čeličnog otpada koji kao sirovina u proizvodnom procesu proizvodnje čelika ima presudan značaj, tj. osim poznavanja približnog kemijskog sastava (otpad od ugljičnih čelika, visoko legiranih čelika itd.), podrazumijeva i poznavanje sadržaja spomenutih onečišćujućih metala i nemetala, a u zadnje vrijeme se nameće nužda poznavanja i eventualne prisutnosti radionuklida;
- Radionuklidi kao onečišćujuće tvari mogu dospjeti u čeličansku elektropec na različite načine s obzirom na to da se koriste u mnogim ljudskim djelatnostima (eksploatacije

ruda, obrada i korištenja ugljena, prirodnog plina, izrada i primjena detektora dima, gromobrana ili različitih razinomjera i sl.) iz kojih po prestanku korištenja mogu dospjeti u čelični otpad;

- Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća u proizvodnji metala pretaljivanjem zabilježen je veći broj nesretnih slučajeva s radioaktivnim izvorima koji su se nehotice našli u prikupljenom metalnom otpadu namijenjenom recikliranju, a posljedice tih nezgoda bile su vrlo ozbiljne kako po zdravlje ljudi tako i po rezultate poslovanja tih gospodarskih subjekata;
- Važnost sprječavanja ulaska otpada onečišćenog radionuklidima u čeličanu ogleda se i u opasnosti od mogućeg štetnog djelovanja radionuklida emitiranih u okoliš iz procesa proizvodnje čelika, kao i štetnog djelovanja radionuklida eventualno dospjelih u proizvedeni čelik ili pak u proizvodni otpad;
- Ovo se postiže primjenom mjera nadzora i kontrole prisutnosti radioanuklida u čeličnom otpadu na samom ulazu u čeličanu i/ili dodatnom kontrolom u čeličnom otpadu prije samog ulaganja u elektropeć;
- Jednako tako, a u svrhu zaštite okoliša od širenja radionuklida, trebalo bi eventualnu prisutnost radionuklida ispitati i u proizvedenom čeliku kao i svim vrstama proizvodnog otpada nastalog u tom procesu (otpadni plinovi, prašina, troska, kovarina, istrošeni vatrostalni materijal itd.).

## LITERATURA

- [1] M. Gojić, Metalurgija čelika, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2005.
- [2] The World Steel Assosiation, Steel Statistical Yearbook, 2016.
- [3] <http://jbfab.com/custom/euspec.pdf> (4.8.2017.).
- [4] <https://www.scribd.com/document/266413623/EFR-EU27-Steel-Scrap-Specification> (4.8.2017.).
- [5] T. Sofilić, B. Bertić, V. Šimunić-Mežnarić, I. Brnadić. Soil Pollution as a Result of Temporary Steel Scrap Storage at Melt Shop, *Ecologia Balkanica*. **5**, 1 (2013) 21-30.
- [6] EFR, EU-27 Steel Scrap Specification, svibanj 2007. [http://www.mgg-recycling.com/wp-content/uploads/2013/06/EFR\\_EU27\\_steel\\_scrap\\_specification.pdf](http://www.mgg-recycling.com/wp-content/uploads/2013/06/EFR_EU27_steel_scrap_specification.pdf) (9.10.2017.).
- [7] World Steel Recycling in Figures 2012 – 2016, Steel Scrap – a Raw Material for Steelmaking, Bureau of International Recycling aisbl, Avenue Franklin Roosevelt 24, 1050 Brussels, Belgium 2017. <http://www.bir.org/assets/Documents/publications/brochures/170698-Ferrous-report-2017-WEB.pdf> (5.8.2017.).
- [8] R. Remus, M. A. Aguado-Monsonet, S. Roudier, L. Delgado Sancho, 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., 429.
- [9] M. Sokić et al. Kvalitet, izvori i bilansiranje otpadaka gvožđa i čelika, *Tehnika – rudarstvo, geologija i metalurgija* **66**, 2 (2015) 251-257.
- [10] T. Sofilić, A. Rastovčan-Mioč, Š. Cerjan-Stefanović, Radioaktivni materijali u čeličnom otpadu, *Strojarstvo* **43**, 1-3 (2001) 65-70.
- [11] T. Sofilić, T. Marijanović, A. Rastovčan-Mioč, Potreba uvođenja sustava za nadzor radioaktivnosti u procesima proizvodnje čelika Hrvatskih čeličana i ljevaonica, *Arhiva za Higijenu Rada i Toksikologiju*, **57** (2006) 45-54.
- [12] T. Sofilić, D. Barišić, U. Sofilić, M. Đureković, Radioactivity of some building and raw materials used in Croatia, *Polish Journal of Chemical Technology* **13**, 3 (2011) 23-27.
- [13] Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN br. 141/13).
- [14] <https://agmetminer.com/2009/02/17/radioactive-stainless-steel-found-in-germany/> (8.8.2017.).
- [15] IAEA – International Atomic Energy Agency, Reducing Risks in the Scrap Metal Industry, Sealed Radioactive Sources, Division of Public Information, IAEA Vienna, Austria, 2005.
- [16] <http://www.thelancet.com/pdfs/journals/lanonc/PIIS1470204510701388.pdf> (8.8.2017.).
- [17] <http://seaisi.org/seaisi2017/file/file/full-paper/Session8B%20Paper5.pdf> (8.8.2017.).
- [18] T. R. Meena, Anojkumar, R. P. Patra, Vikas, S. S. Patil, M. K. Chatterjee, Ranjit Sharma, S. Murali, Radiological emergency due to postulated events of melted radioactive material mixed in steel reaching public domain, *Radiation Protection and Environment* **37**, 2 (2014) 68-70.
- [19] <http://www.wdrb.com/story/31358264/radioactive-scrap-metal-found-at-a-louisville-recycling-center-dropped-off-by-a-competitor> (8.8.2017.).
- [20] United Nations Economic Commission for Europe, Recommendations on Monitoring and Response Procedures for Radioactive Scrap Metal, UN, New York and Geneva, 2006. [https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/radiation/docs/recommendations\\_e.pdf#GeneralProvisions](https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/radiation/docs/recommendations_e.pdf#GeneralProvisions) (8.8.2017.).
- [21] <http://www.darkgovernment.com/news/department-of-energy-wants-to-let-radioactive-scrap-metal-back-into-consumer-products/> (9.8.2017.).



- [22] <http://www.cantonrep.com/news/20160407/radioactive-scrap-forces-closure-of-psc-metals-massillon-facility> (9.8.2017.).
- [23] T. Sofilić, A. Rastovčan-Mioč, Š. Cerjan-Stefanović, Ž. Grahek, Opravdanost praćenja prisutnosti radionuklida u čeličnom otpadu i sirovom čeliku, *Strojarstvo* **43**, 4-6 (2001) 203-209.
- [24] M. Marseguerra, E. Zio, Monte Carlo approach to the detectability of a gamma source within a scrap-iron truckload, *Nuclear Technology*, **126** (1999) 279-288.
- [25] <http://www.cnic.jp/english/newsletter/nit96/nit96articles/nw96.html#basicplan> (21.8.2017.).
- [26] <http://ita.arpalombardia.it/ita/console/files/download/86/radioactivity.pdf> (21.8.2017.).
- [27] <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/radiation/docs/brazil.pdf> (21.8.2017.).
- [28] [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/37/004/37004401.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/004/37004401.pdf) (21.8.2017.).
- [29] [http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/Service/Publikationen/Hintergrundpapier\\_NORM\\_Radioaktivitaet-Tiefengeothermie.pdf](http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/Service/Publikationen/Hintergrundpapier_NORM_Radioaktivitaet-Tiefengeothermie.pdf) (28.8.2017.).
- [30] D. Neuschütz, D. Spirin, u. Quade, J. Meier-Kortwig, L. Holappa, M. Hämäläinen, M. A. Heredia Lozano and M. J. Guio Bonany, Inadvertent Melting of Radioactive Sources in BOF or EAF: Distribution of Nuclides, Monitoring, Prevention, *ISIJ International* **45** (2005) 288-295.
- [31] <http://www.atomtex.com/en/application/metallurgicheskaya-promyshlennost> (13.11.2017.).
- [32] <http://www.flir.it/threatdetection/display/?id=63333> (13.11.2017.).
- [33] <http://www.mmhrecsys.co.za/manufacturer/radcomm> (14.11.2017.).
- [34] <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/RADEYEGRDS2> (14.11.2017.).
- [35] <http://www.peo-radiation-technology.com/en/products/industry/installed-monitors/> (14.11.2017.).
- [36] <http://ludlums.com/contacts/ludlum-company-headquarters> (14.11.2017.).
- [37] <http://www.peo-radiation-technology.com/en/history/> (14.11.2017.).
- [38] <http://ludlums.com/component/virtuemart/equipment-type-3/gate-monitoring-9/vehicle-gateway-monitors-295-detail?Itemid=2657> (14.11.2017.).
- [39] [http://ludlums.com/images/stories/catalogs/Medical-Physics\\_Catalog\\_Web.pdf](http://ludlums.com/images/stories/catalogs/Medical-Physics_Catalog_Web.pdf) (14.11.2017.).
- [40] <http://www.radcommeurope.com/English/Products/Charging%20bucket.htm> (18.11.2017.).
- [41] T. Sofilić, D. Barišić, U. Sofilić, Monitoring of  $^{137}\text{Cs}$  in electric arc furnace steel making process, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **47** (2011) 125-136.
- [42] T. Sofilić, D. Barišić, U. Sofilić, J. Živković, Monitoring of radionuclides in In carbon steel blooms produced by EAF process, *Journal of Mining and Metallurgy Section B-Metallurgy* **47**, 2 B (2011) 125 – 136.
- [43] Control of orphan sources and other radioactive material in the metal recycling and production industries, Specific safety guide, International Atomic Energy Agency – IAEA, Vienna, Austria, 2012., 54.
- [44] Ionising Radiation Metrology for the Metallurgical Industry, Final Publishable JRP Report, EURAMET and EU, Braunschweig, Germany, 2015. <http://projects.ciemat.es/documents/16805/0/IND04+Final+Publishable+Report+v5+-+copia.pdf/434a7439-bc33-46ba-9601-8261be8ae027> (26.11.2017.).
- [44] [http://www.irpa.net/irpa7/cdrom/VOL.3/S3\\_64.PDF](http://www.irpa.net/irpa7/cdrom/VOL.3/S3_64.PDF) (27.11.2017.).
- [45] <https://www.consumer.org.my/index.php/products/106-household/205-radioactive-metals-in-consumer-products> (27.11.2017.).

- [46] <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/new-calibration-standards-accurate-radioactivity-measurements-steel-industry> (27.11.2017.).
- [47] Direktiva Vijeća 2013/59/Euratom od 5. prosinca 2013. o osnovnim sigurnosnim standardima za zaštitu od opasnosti koje potječu od izloženosti ionizirajućem zračenju, i o stavljanju izvan snage direktiva 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom i 2003/122/Euratom. (Sl. L 13, 17.1.2014., str. 1-73 i Sl. L 137, 25.6.2016., str. 27).
- [48] [http://britishsteel.co.uk/media/40542/radioactivity-in-steel\\_nov-2016.pdf](http://britishsteel.co.uk/media/40542/radioactivity-in-steel_nov-2016.pdf) (27.11.2017.).
- [49] [http://sections.arcelormittal.com/index.php?eID=tx\\_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/redaction/3-Download\\_center/2-Certificates\\_Declarations/Non-radioactivity\\_EN.pdf&t=1511856920&hash=1c3c6906703f996aa4c46ba4dd5bac822c4e23ee](http://sections.arcelormittal.com/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/redaction/3-Download_center/2-Certificates_Declarations/Non-radioactivity_EN.pdf&t=1511856920&hash=1c3c6906703f996aa4c46ba4dd5bac822c4e23ee) (27.11.2017.).
- [50] H. G. Wilshire, J. E. Nielson, R. W. Hazlett, *The American West at Risk: Science, Myths, and Politics of Land Abuse and Recovery*, Oxford University Press, New York, SAD, 2008.
- [51] <https://www.iaea.org/newscenter/news/depleted-uranium-bosnia-herzegovina> (27.11.2017.).
- [52] M. Burger, *The risks of depleted uranium contamination in post-conflict countries: Findings and lessons learned from UNEP field assessments*, Swiss Ministry of Defense, Civil Protection and Sports, United Nations Environment Programme (UNEP), ed. D. Jensen, S. Lonergan, London, GB, 2012.
- [53] [https://environmentalpeacebuilding.org/assess/Documents/LibraryItem\\_000\\_Doc067.pdf](https://environmentalpeacebuilding.org/assess/Documents/LibraryItem_000_Doc067.pdf) (27.11.2017.).
- [54] T. Sofilić, T. Marjanović, A. Rastovčan-Mioč, Uvođenje sustava za nadzor radioaktivnosti u procesima proizvodnje čelika, Zbornik radova šestog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja, Garaj Vrhovac V., Kopjar N., Miljanić S., Hrvatsko društvo za zaštitu od zračenja, Stubičke Toplice 2005, 425-432.
- [55] T. Sofilić, A. Rastovčan-Mioč, Š. Cerjan-Stefanović, Ž. Grahek, Prisutnost radionuklida u čeličnom otpadu, sirovom čeliku, elektropečnoj troski i prašini, MATRIB 2001, Grilec K., Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2001, 227-231.
- [56] T. Sofilić, D. Barišić, Ž. Grahek, Š. Cerjan-Stefanović, A. Rastovčan-Mioč, B. Mioč, Radionuclides in Metallurgical Products and Waste, *Acta Metallurgica Slovaca*, **10**, 1 (2004) 29 – 35.
- [57] Tehničko-tehnološko rješenje za postojeće postrojenje čeličane ABS Sisak d.o.o., Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2013. [http://www.mzoip.hr/doc/tehnicko-tehnolosko\\_rjesenje\\_17.pdf](http://www.mzoip.hr/doc/tehnicko-tehnolosko_rjesenje_17.pdf) (27.11.2017.)

# ŽIVOTOPIS

## Osobni podaci:

Ime i prezime: Don Vito Lukšić  
Datum i mjesto rođenja: 07.02.1996. Sisak  
Adresa: Ferde Hefelea 47, 44000 Sisak  
Telefon: 095/853-1671  
E-mail: vito.mmss@hotmail.com

## Obrazovanje:

2002.-2010. - Osnovna škola 22.lipnja  
2010.-2014. - Tehnička škola Sisak, Ekološki tehničar  
2014.-2018. - Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet Sisak, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija, smjer Industrijska ekologija

## Vještine:

Rad na računalu: Microsoft Excel, Microsoft Word, Microsoft PowerPoint, Osnove AutoCAD-a, uređivanje video zapisa.

Strani jezik: Engleski